УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КИРИЛ И МЕТОДИЈ“ ВО СКОПЈЕ

МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ – СКОПЈЕ

ИНСТИТУТ ЗА ЗАВАРУВАЊЕ И ЗАВАРЕНИ КОНСТРУКЦИИ

МАРТИН АЦО ПЕТРЕСКИ

ИСТРАЖУВАЊЕ НА ВЛИЈАНИЕТО НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ХИБРИДНО ЗАВАРУВАЊЕ СО ЛАСЕРСКИ СНОП И ЕЛЕКТРИЧЕН ЛАК ВРЗ КАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ХИБРИДЕН ЗАВАР НА КОНСТРУКТИВЕН ЧЕЛИК

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

СКОПЈЕ, 2025

SS „CYRIL AND METHODIUS“ UNIVERSITY IN SKOPJE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING – SKOPJE

INSTITUTE FOR WELDING AND WELDED STRUCTURES

MARTIN ACO PETRESKI

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF HYBRID LASER ARC WELDING PARAMETERS ON THE HYBRID WELD CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL STEEL

DOCTORAL DISSERTATION

SKOPJE, 2025

Ментор:

Проф. д-р. **Глигорче ВРТАНОСКИ**

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Машински факултет – Скопје

Комисија за одбрана:

Проф. д-р. Добре РУНЧЕВ, претседател

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Машински факултет – Скопје

Проф. д-р. Глигорче ВРТАНОСКИ, ментор

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Машински факултет – Скопје

Проф. д-р. Зоран БОГАТИНОСКИ, член

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Машински факултет – Скопје

Проф. д-р. Марјан ГАВРИЛОСКИ, член

Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ во Скопје, Машински факултет – Скопје

Проф. д-р. Стојанче НУСЕВ, член

Универзитет „Св. Климент Охридски“ – Битола, Технички факултет Битола

Научна област: **МАШИНСТВО**

Датум на одбрана:

м-р Мартин Петрески

ИСТРАЖУВАЊЕ НА ВЛИЈАНИЕТО НА ПАРАМЕТРИТЕ НА ХИБРИДНО ЗАВАРУВАЊЕ СО ЛАСЕРСКИ СНОП И ЕЛЕКТРИЧЕН ЛАК ВРЗ КАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ХИБРИДЕН ЗАВАР НА КОНСТРУКТИВЕН ЧЕЛИК

Апстракт: Хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак (HLAW) е процес кој успешно ги комбинира предностите на заварувањето со ласерски сноп и заварувањето со топлива електродна жица под заштитен гас, што резултира во процес со големи брзини на заварување, минимален внес на топлина и голема длабочина на пенетрација. Покрај овие значајни предности неговата имплементација во индустријата е ограничена поради високите почетни трошоци, дополнителните безбедносни мерки и комплексноста на самиот процес поради големиот број на параметри.

Основна цел на истражувањето опфатено во оваа докторска дисертација е да се определи влијанието на параметрите на хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак врз карактеристиките на хибриден завар изведен во еден премин на конструктивен челик во квалитет S355J2 со дебелина од 12 (mm). За определување на влијанието е користен повеќефакторен експеримент во кој независно променливите големини се менуваат во повеќе интервали: моќноста на ласерскиот сноп (11,5–13kW), брзината на заварување (1,8–2,2 m/min) и јачината на струјата за заварување (303 – 329 A).

За утврдување на квалитетот на хибридните завари и влијанието на параметрите на заварување, извршени се неколку видови на контроли и испитувања: визуелно и димензионално испитување, радиографско испитување, испитување на затегнување и свиткување, испитување на жилавост со Шарпиев метод, испитување на тврдина со Викерсов метод во металот на заварот и зоната под влијание на топлина, како и металографско испитување.

Од извршените испитувања и анализа на експерименталните резултати е определено дека сите независно променливи големини имаат значајно влијание врз зависно променливата големина – затегнувачка јакост на завареният спој. Моќноста на ласерскиот сноп и јачината на струјата на заварување имаат позитивно влијание, додека брзината на заварување има негативно влијание, кое може да се ублажи преку позитивниот интеракциски ефект со јачината на струјата на заварување. Оптимални резултати Rm = 744 (N/mm^2) се постигнуваат кога моќноста на ласерскиот сноп и електричниот лак се на највисоко ниво, додека брзината на заварување да се одржува на најниско ниво.

Клучни зборови: хибродно заварување, ласерски сноп, електричен лак, брзина на заварување, моќност на ласерски сноп, струја за заварување, механички карактеристики, затегнувачка јакост, погонска енергија.

Martin Petreski MSc ME

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF HYBRID LASER ARC WELDING PARAMETERS ON THE HYBRID WELD CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL STEEL

Abstract: Hybrid laser–arc welding process combines the advantages of both welding processes, laser beam welding and gas metal arc welding, resulting in welding process that is characterized with high welding speed, low heat input and high penetration depth. Despite its notable advantages, the industrial implementation of hybrid laser-arc welding remains limited, primarily due to the high initial investment costs, the need for additional safety measures, and the inherent complexity of the process arising due to the large number of interacting parameters.

The main objective of the research covered in this doctoral thesis is to determine the influence of hybrid laser –arc welding on the hybrid weld characteristics weld performed in one pass on structural steel grade S355J2 with a thickness of 12 (mm). To evaluate this influence, a multifactorial experimental design was employed, in which the independent variables were varied within defined ranges: laser beam power (11.5–13 kW), welding speed (1.8–2.2 m/min), and welding current (303–329 A).

Several types of tests have been conducted to determine the quality of hybrid welds and to evaluate the influence of the welding parameters, such as: visual and dimensional inspections, radiographic examinations, tensile and bending tests, Charpy impact toughness testing, Vickers hardness measurements in the weld metal and the heat-affected zone, as well as metallographic testing.

The conducted tests and subsequent analysis of the experimental results revealed that all independent variables have a significant impact on the dependent variable – the tensile strength of the welded joint. Specifically, laser beam power and welding current demonstrated a positive effect, whereas welding speed has a negative impact, which can be mitigated through its positive interaction with the welding current. Optimal results (Rm = 744 N/mm²) were achieved when the laser beam power and the welding current were maintained at their highest levels, while the welding speed was set to its lowest level.

Key words: hybrid welding, laser beam, arc, welding speed, laser power, welding current, mechanical properties, tensile strength, total heat input.

Изјавувам дека докторската дисертација ја изработив самостојно, дека уредно ги цитирам сите користени извори и литература и дека дисертацијата не е користена во рамките на други универзитетски студии или за стекнување на друго звање.

Содржина

1. Вовед 1

2. Состојба на познавања од истражуваната област – преглед на литература 6

2.1. Параметри кај хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак - HLAW 6

2.1.1. Видот на ласерскиот извор и неговата моќност 7

2.1.2. Редослед и растојание помеѓу изворите на топлина 10

2.1.3. Позиционирање на фокусот на ласерскиот сноп 12

2.1.4. Агол на поставеност на електродната жица 13

2.1.5. Вид на заштитен гас и количина на проток 14

2.1.6. Брзина на заварување 16

2.1.7. Брзина на доведување на додатен материјал 17

2.1.8. Влијание на јачина на струјата за заварување, напон на електричниот лак и поларитет 18

2.1.9. Влијание на подготовка на жлебот за заварување и ширина на грлото 20

2.1.10. Перформанси и индустриска примена на HLAW на конструктивен челик 22

2.2. Означување и поделба на челиците (конструктивни челици) 25

2.2.1. Означување на челиците 25

2.2.2. Поделба на челиците 26

2.3. Нелегирани (конструктивни) челици и нивна заварливост 29

2.3.1. Нелегирани – конструктивни челици 29

2.3.2. Заварливост на нелегирани – конструктивни челици 32

2.4. Процедура за испитување на заварени споеви изведени со HLAW 36

3. Предмет, цели и методологија на истражување 46

3.1. Идентификација на проблем 46

3.2. Предмет и цели на истражување 47

3.3. Хипотези. 48

3.4. Методологија на истражување 48

3.4.1. Теоретски истражувања 49

3.4.2. Прелиминарно истражување 49

3.4.3. Експериментално истражување 49

4. Експериментално истражување 52

4.1. Технички податоци за материјалите и опремата за заварување 52

4.1.1. Технички податоци за основниот материјал 52

4.1.2. Технички податоци за додатниот материјал 52

4.1.3. Технички податоци за заштитниот гас 53

4.1.4. Технички податоци за опремата за заварување 54

4.2. Подготовка на елементите за заварување 57

4.3. Изведба на хибридното заварување 58

4.3.1. Процедура и параметри за хибридното заварување на заварените проби 59
4.4. Испитување на изведените хибридни завари 68
5. Резултати и анализа на податоци 80
5.1. Резултати и анализа на податоци од визуелна контрола 80
5.1.1. Влијание на јачина на струја за заварување 83
5.1.2. Влијание на брзина на заварување 84
5.2. Резултати и анализа на податоци од радиографска контрола 86
5.3. Резултати и анализа на податоци од испитување на затегнување 88
5.4. Резултати и анализа на податоци од испитување на свиткување 94
5.5. Резултати и анализа на податоци од испитување на жилавост 98
5.6. Резултати и анализа на податоци од испитување на тврдина 101
5.7. Резултати и анализа на податоци од металографски испитувања 104
6. Статистичка обработка на резултатите од испитување на затегнување 109
6.1. Ортогонален метод 109
6.1.1. Алгоритам за дисперзивна и регресивна анализа на експериментално добиените резултати 109
6.1.2. Обработка на експериментално добиените резултати 111
6.1.3. Анализа на добиените модели 124
6.2. Taguchi метод (ортогонални низи и S/N) 125
6.2.1. Обработка на експериментално добиените резултати 125
6.2.2. Анализа на просечните S/N вредности 127
7. Техно-економска анализа на хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак 128
8. Заклучок 132

Користена литература 135

Прилог 142

Листа на слики

Слика 1.1: Поделба на процесите на заварување со топлинска енергија 1
Слика 2.1: Систем за хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак 6
Слика 2.2: Шематски приказ на параметрите на хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак..... 7
Слика 2.3: Попречен пресек на хибриден завар изведен со различна моќност на топлински извори 10
Слика 2.4: Распоред на поставеност помеѓу двата топлински извори кај хибридно заварување 10
Слика 2.5: Попречен пресек на хибриден завар кај конструктивен челик изведен со различен редослед на изворите на топлина 11
Слика 2.6: Зони на завар изведен хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак..... 12
Слика 2.7: Попречен пресек на хибриден завар изведен со различен фокус на ласерскиот сноп и моќност на ласерскиот извор 13
Слика 2.8: Попречен пресек на хибриден завар изведен со различна поставеност на електродна жица во однос на основен материјал 14
Слика 2.9: Попречен пресек на хибриден завар изведен со различни соодноси на гасна мешавина на аргон и хелиум 15
Слика 2.10: Ефект на количината на проток врз пенетрацијата кај хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак со различен сооднос на He-Ar 16
Слика 2.11: Ширина и пенетрација на заварот добиени со хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак во функција од брзината на заварување при различни брзини на доведување на додатен материјал 17
Слика 2.12: Тврдина кај Т- хибридни завари кај бродски челичен лим АН36 во зависност од брзина на заварување 17
Слика 2.13: Попречен пресек на Т-хибриден завар изведен со различни брзини на доведување на додатен материјал 19
Слика 2.14: Попречен пресек на хибриден завар при различни широчини на грло..... 20
Слика 2.15: Видови подготовка на жлебови за хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак на поголеми дебелини 21
Слика 2.16: Влијание на содржина на јаглерод врз механички карактеристики на јаглероден челик . 30
Слика 2.17: Димензии на тест парче за сочелен завар на плоча со делумна или целосна пенетрација..... 36
Слика 2.18: Димензии на тест парче за аголен завар со делумна или целосна пенетрација 37
Слика 2.19: Локации за изработка на епрувети за мехнички испитувања на сочелен завар на плоча..... 39
Слика 2.20: Епрувета за испитување на затегнување на сочелен завар кај плочи 39
Слика 2.21: Епрувета за испитување на свиткување..... 40
Слика 2.22: Локации за изработка на епрувети за испитување на свиткување од страна на лицето и коренот на заварот..... 41
Слика 2.23: Епрувети за испитување на жилавост со „V“ или „U“ зарез..... 42

Слика 2.24: Локации за изработка на епрувети за испитување на жилавост 42
Слика 2.25: Локации – зони за мерење на тврдина на завареният спој 44
Слика 2.26: Локации и растојание за индивидуално мерење на тврдина во ЗВТ 45
Слика 4.1: Шише за заштитен гас и цевен систем со вентили за регулација 54
Слика 4.2: Fiber ласер IPG 20-kW Yb со ласерска глава BIMO HP 55
Слика 4.3a: Апарат за заварување Qineo Pulse 600A со уред за доведување на жица QineoWire drive automation 56
Слика 4.3b: Индустриски робот со ласерска глава и горилник за MIG заварување и работна маса со елементите за заварување 56
Слика 4.4: Мерење на просечна рапавост на површините на рабовите за заварување 57
Слика 4.5: Пример на изолација и пакување на елементите за заварување при транспорт 58
Слика 4.6: Положби на заварување според стандард EN ISO 6947 59
Слика 4.7: Толеранции на ротациони и линиски отстапувања за положба PA 59
Слика 4.8: Позиционирање и прицврстување на елементите за заварување 60
Слика 4.9: Растојание помеѓу изворите на топлина и жлеб на чаурата за довод на заштитен гас 61
Слика 4.10: Калибратор и калибрирање на фокусот на ласерскиот сноп – 3 (mm) под површината на елементите кои се заваруваат 61
Слика 4.11: Поставеност на електродната жица и ласерскиот сноп во однос на површината на заваруваните елементи, слободен крај на жицата и проток на заштитен гас 62
Слика 4.12: Означување на секоја заварена проба со мрсна боја во долниот десен агол 63
Слика 4.13: Лице, корен и радиографска снимка од хибридни завари со ознака 4-1 и 4-2 64
Слика 4.14: Подесување на параметрите на заварување и излезни вредности на јачина на струја за заварување и напон на електричен лак 65
Слика 4.15: Количество на енергија внесена на единица должина од заварот QP 66
Слика 4.16: Означени локации за изработка на епрувети за испитување кај хибридно заварените проби 68
Слика 4.17: Димензионални мерења на лицето и коренот на хибридните завари 69
Слика 4.18: Графикон за усвојување на напонот за прозрачување 70
Слика 4.19: Изработка на епрувети за механички испитувања на машинска пила 71
Слика 4.20: a) Нестандардни епрувети за испитување на затегнувачка јакост на заварот, b) стандардна епрувета; c) жлеб согалсно стандард ISO 9017 72
Слика 4.21: Изработен симетричен жлеб со помош на пилесто глодало кај нестандардна епрувета 72
Слика 4.22: Машина за испитување на затегнувачка јакост SHIMADZU AG-X Floor Tube 73
Слика 4.23: Технолошко испитување на свиткување на хибридни завари 74
Слика 4.24: Локации за изработка на епрувети за испитување на жилавост 74
Слика 4.25: Епрувети за испитување на жилавост на -20 (°C) и Шарпиево нишало на кое е извршено испитувањето 75
Слика 4.26: Локации на индивидуални отпечатоци во зона на ласерскиот сноп 76
Слика 4.27: Редови и локции на индивидуални отпечатоци кај хибриден завар 77
Слика 4.28: Епрувети за испитување на металографија 78

Слика 4.29: Миркоскоп OMAX M837 и дигитална камера OMAX 5MP A3550 79
Слика 4.30: Шематски приказ на геометриски димензии на хибриден завар 79
Слика 5.1: Попречен пресек на хибридните завари 80
Слика 5.2: Влијание на Qp врз длабочината на пенетрација во зона на електричен лак 82
Слика 5.3: Влијание на Qp врз длабочината на пенетрација во зона на ласерски сноп 82
Слика 5.4: Влијание на јачината на струјата на заварување врз формата на заварот при P_L = 13 (kW), Vz = 2,2 (m/min) 83
Слика 5.5: Влијание на брзината на заварување врз формата на заварот при P_L = 13(kW), Iz = 303 (A) 84
Слика 5.6: Интеракција помеѓу брзина на заварување и јачина на струја врз широчина на заварот (b) 85
Слика 5.7: Интеракција помеѓу брзина на заварување и јачина на струја врз длабочина на пенетрација во зона на електричен лак 85
Слика 5.8: Радиографски снимки од хибрдини завари 5-1, 8 и 9 87
Слика 5.9: Радиографски снимки од хибрдини завари 13, 15 и 19 87
Слика 5.10: Дијаграми „напон–единечно издолжување“ на стандардни епрувети од хибридни завари 89
Слика 5.11: Стандардни епрувети за испитување на затегнувачка јакост на хибридни завари по процесот на испитување 90
Слика 5.12: Дијаграми „напон – единечно издолжување“ на нестандардни епрувети од хибридни завари 90
Слика 5.13: Дијаграми „напон – единечно издолжување“ на нестандардни епрувети од хибридни завари од ортогоналниот метод 92
Слика 5.14: Влијание на Qp врз максимална затегнувачка јакост на хибридни завари 93
Слика 5.15: Површини на прекин кај нестандардни епрувети при испитување на затегнување 94
Слика 5.16: Епрувети за испитување на свиткување од страна на лицето на заварот (FBB) 95
Слика 5.17: Епрувети за испитување на свиткување од страна на коренот на заварот (RBB) 97
Слика 5.18: Интеракција помеѓу јачина на струја на заварување и брзина на заварување врз отпорноста на свиткување од страна на лицето на заварот 98
Слика 5.19: Графички приказ на жилавост по Шарпи кај хибриден завар бр. 5-1 изведен со параметри: PL = 11.5 (kW), IZ= 329 (A) и VZ = 1.8 (m/min); OP = од 0.77 (kJ/mm^2) 99
Слика 5.20: Графички приказ на жилавост по Шарпи кај хибриден завар бр. 12-1 изведен со параметри: PL = 11.5 (kW), IZ= 303 (A) и VZ = 2.2 (m/min); OP = од 0.55 (kJ/mm^2) 99
Слика 5.21: Влијание на Qp врз жилавоста во металот на заварот во зона на електричен лак 100
Слика 5.22: Влијание на Qp врз жилавоста во металот на заварот во правец нормален на оската на завар 100
Слика 5.23: Влијание на Qp врз жилавост во линија на фузија во правец нормален на оската на завар 101
Слика 5.24: Графички приказ на измерена тврдина по Викерс со параметри: а) 9 P_L = 13 (kW), I_Z= 303 (A) и V_Z = 1,8 (m/min); b) 17 P_L = 12,5 (kW), I_Z= 303 (A) и V_Z = 2,2 (m/min) 102

Слика 5.25: Графички приказ на измерена тврдина по Викерс со параметри: а) 5-1 P_L = 13 (kW), I_Z= 329 (A) и V_Z = 1,8 (m/min); b) 12-1 P_L = 11,5 (kW), I_Z= 303 (A) и V_Z = 2,2 (m/min) 102
Слика 5.26: Макрографски снимки на хибридни завари..... 104
Слика 5.27: Карактеристичните микроструктури (x40) 105
Слика 5.28: Микроструктура на хибриден завар 5-1 (x400) 106
Слика 5.29: Микроструктура на хибриден завар 12-1 (x400) 107
Слика 6.1: 3Д Графички приказа на моделот при P_L(min) = 11,5 (kW)..... 115
Слика 6.2: 2Д Графички приказа на моделот при P_L(min) = 11,5 (kW)..... 115
Слика 6.3: 3Д Графички приказа на моделот при P_L(srd) = 12,2 (kW)..... 116
Слика 6.4: 2Д Графички приказа на моделот при P_L(srd) = 12,2 (kW)..... 116
Слика 6.5: 3Д Графички приказа на моделот при P_L(max) = 13,0 (kW)..... 117
Слика 6.6: 2Д Графички приказа на моделот при P_L(max) = 13,0 (kW)..... 117
Слика 6.7: 3Д Графички приказа на моделот при V_Z (min) = 1,8 (m/min) 118
Слика 6.8: 2Д Графички приказа на моделот при V_Z (min) = 1,8 (m/min) 118
Слика 6.9: 3Д Графички приказа на моделот при V_Z (srd) = 2,0 (m/min)..... 119
Слика 6.10: 2Д Графички приказа на моделот при V_Z (srd) = 2,0 (m/min)..... 119
Слика 6.11: 3Д Графички приказа на моделот при V_Z (max) = 2,2 (m/min)..... 120
Слика 6.12: 2Д Графички приказа на моделот при V_Z (max) = 2,2 (m/min)..... 120
Слика 6.13: 3Д Графички приказа на моделот при I_Z (min) = 303 (A) 121
Слика 6.14: 2Д Графички приказа на моделот при I_Z (min) = 303 (A) 121
Слика 6.15: 3Д Графички приказа на моделот при I_Z (srd) = 316 (A)..... 122
Слика 6.16: 2Д Графички приказа на моделот при I_Z (srd) = 316 (A)..... 122
Слика 6.17: 3Д Графички приказа на моделот при I_Z (max) = 329 (A)..... 123
Слика 6.18: 2Д Графички приказа на моделот при I_Z (max) = 329 (A)..... 123
Слика 6.19: Графички приказа на влијание на факторите врз затегнувачката јакост 127

Листа на табели

Табела 2.1: Споредба на карактеристики на ласерските извори 8
Табела 2.2: Густината на енергија при различно фокусно растојание и моќност на ласерот 12
Табела 2.3: Влијание на HLAW параметри на заварување врз формата на заварот..... 23
Табела 2.4: Табеларен приказ на механички карактеристики на четири вида конструктивни челици 31
Табела 2.5: Табеларен приказ на хемиски состав на четири вида конструктивни челици 31
Табела 2.6: Примена на предгреење во зависност од CE 34
Табела 2.7: Испитување и тестирање на заварени проби..... 38
Табела 2.8: Дименизии на епрувети за испитување на затегнување на сочелен завар 40
Табела 2.9: Дименизии и толеранции на епрувети за испитување на жилавост 43
Табела 4.1: Хемиски состав на основниот материјал S355J2 52
Табела 4.2: Механички карактеристики на основниот материјал S355J2 52
Табела 4.3: Параметри на заварување при користење на G3Si1 со дијаметар од Ø1,2 (mm) 53
Табела 4.4: Хемиски состав на додатниот материјал G3Si1 53
Табела 4.5: Механички карактеристики на додатниот материјал G3Si1 53
Табела 4.6: Подготовка на рабовите за заварување во согласно со EN ISO 9692-1 57
Табела 4.7: Параметри на хибридното заварување при прелиминарното истражување..... 63
Табела 4.8: Параметри на хибридното заварвуање при експерименталното истражување..... 66
Табела 4.9: Ортогонална матрица со кодирани и реални вредности на независно променливи големини 67
Табела 4.10: Матрица L9 по Taguchi со кодирани и реални вредности на независно променливи големини 67
Табела 4.11: Фази на брусење на епрувети за металографија 78
Табела 4.12: Полирање на епрувети за металографија..... 78
Табела 5.1: Резултати од димензионално мерење на хибридните завари 80
Табела 5.2: Максимални вредности за површински несовршености кај хибридни завари 81
Табела 5.3: Резултати од радиографска контрола на хибридни завари 86
Табела 5.4: Резултати од испитување на затегнување на стандардни епрувети..... 88
Табела 5.5: Резултати од испитување на затегнување на нестандардни епрувети..... 91
Табела 5.6: Резултати од испитување на свиткување (агол на свиткување)..... 96
Табела 6.1: Кодирана матрица на планот 111
Табела 6.2: Измерени врендости од планот..... 112
Табела 6.3: Кодирана матрица и измерени вредности од планот со пресметан S/N 126
Табела 6.4: Пресметани просечни S/N вредности по ниво 126
Табела 7.1: Вкупни трошоци за подготовка на елементите за заварување (C_P)..... 129
Табела 7.2: Вкупни трошоци при процесот на заварување (C_W)..... 129
Табела 7.3: Вкупни трошоци за опрема и работна сила за HLAW и MIG заварување 130
Табела 7.4: Вкупни трошоци по процесот на заварување (C_{PP})..... 130
Табела 7.5: Вкупни трошоци за заварување (C_T) 131

Преглед на големини, ознаки и кратенки

1. A (mm^2) – Површина
2. A_o (mm^2) – Попречен пресек на епрувета пред издолжување
3. A_k (mm^2) – Попречен пресек по кинење на епруветата
4. d (mm) – Дијагонала
5. d1 (mm) – Главна дијагонала
6. d2 (mm) – Споредна дијагонала
7. EPP – Електролачно заварување под прашок
8. OM – Основен материјал
9. b (mm) – Ширина на епруветата
10. Lt (mm) – Должината на епруветата
11. d (mm) – Дијаметар на внатрешниот цилиндер
12. Iz (A) – Јачина на струјата за заварување
13. VWT – Зарез во зона на заварот
14. VHT – Зарез во зона линија на фузија
15. Nd: YAG – Цврст ласер со пулсно т.н. квазиконтинуирано дејство
16. R_a (μm) – Просечна грубост на профилот
17. R_p (μm) – Максимална висина на профилот
18. R_z (μm) – Просечна максимална висина
19. Q_H (kJ/mm) – Погонска линиска енергија на хибридниот процес
20. Q_L (kJ/mm) – Погонска линиска енергија од ласерски сноп
21. Q_A (kJ/mm) – Погонска линиска енергија од електричниот лак
22. LBW (Laser Beam Welding) – Заварување со ласерски сноп
23. GMAW (Gas-shielded metal arc welding) – Електролачно заварување со полна жица во заштитна атмосфера од гасови
24. FCAW (Flux-Cored Arc Welding) Електролачно заварување со полнета жица
25. HLAW (Hybrid Laser Arc Welding) Заварување со ласерски сноп и електричен лак
26. MIG (Metal Inert Gas) – Електролачно заварување со топлива електрода во заштита на инертен гас
27. MAG (Metal Active Gas) – Електролачно заварување со топлива електрода во заштита на активен гас
28. TIG (Tungsten Inert Gas) – Електролачно заварување со нетоплива електрода во заштита на инертен гас
29. ЗВТ – Зона под влијание на топлина
30. P_L (W) – Моќност на ласерски сноп

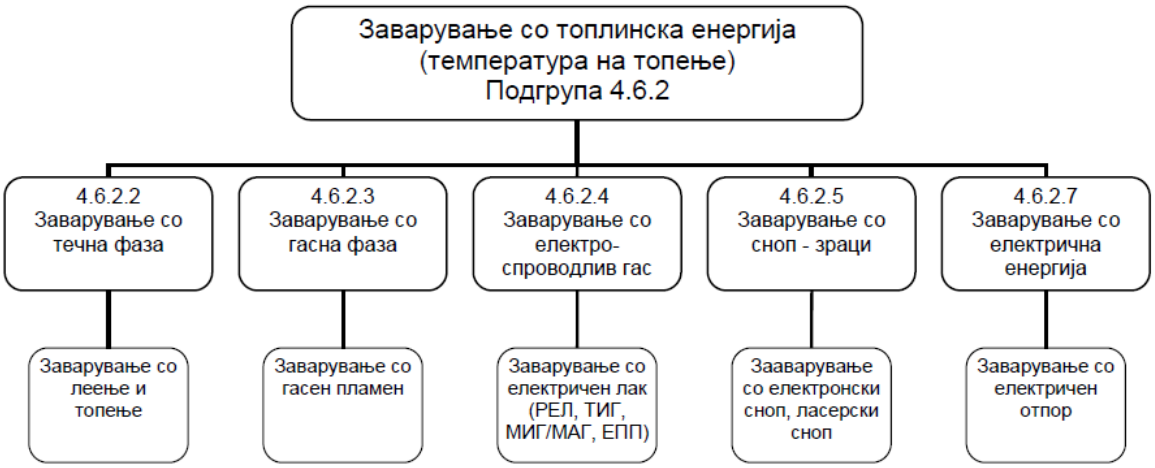
31. λ (μm) – Бранова должина на емитирана светлина
32. P_A (W) – Моќност на електричен лак
33. Vz (mm/min) – Брзина на заварување
34. η_L – Коефициент на ефикасност за ласерски сноп
35. η_A – Коефициент на ефикасност за електричниот лак
36. KU – Жилавост
37. Tp – Температура на предгреење по Seferijan
38. WPQR (Welding Procedure Qualification Record) – Квалификација на технологијата за заварување
39. pWPS (preliminary Welding Procedure Specification) – Прелиминарна квалификација на технологијата за заварување
40. МЗ – Метал на заварот
41. ЗВТ – Зона под влијание на топлина
42. Cekv (%) – Еквивалент на јаглерод
43. ts (mm) – Дебелина на завар
44. t (mm) – Дебелина на основен материјал
45. RBB – Страна на коренот
46. FBB – Лице на заварот
47. ρ (J/cm^2) – Жилавост по Шарпи
48. F (N) – Сила на втиснување
49. S (mm^2) – Површина на отпечатокот
50. hp1(mm) – Длабочина на пенетрација во зона на електричниот лак
51. hp2 (mm) – Длабочина на пенетрација во зона на ласерскиот сноп
52. ДМ – Додатен материјал
53. REL – Рачно електролачно заварување
54. ε (%) – Деформација
55. Δl (mm) – Издолжување на епруветата
56. HV (daN/mm^2) – Тврдина по Викерс
57. HV5 (daN/mm^2) – Тврдина по Викерс за (F = 5 daN)
58. F (N) – Сила на истегнувањето
59. T (^{o}C) – Температура
60. G (Kg) – Тежина
61. Wo (kJ) – Работата потрошена за кршење на епруветата
62. σ (N/mm^2) – Напон
63. R_{eH} (N/mm^2) – Граница на течење
64. R_m (N/mm^2) – Граница на максимална затегнувачка јакост
65. R_v (N/mm^2) – Граница на развлекување

66. R_k (N/mm^2) – Граница на кинење
67. V (m/min) – Брзина
68. V_{et} (kg/h) – Брзина на топење на жица
69. V_e (mm/s) – Брзина на доведување на жица
70. M_{max} (Nm) – Максимален момент на свиткување
71. W (mm^3) – Отпорен момент на попречен пресек
72. PA – Хоризонтална положба на заварување
73. ω (mm) – Дебелина на прозрачување
74. UI (U) – Напон на лакот за заварување
75. l_o (mm) – Почетна должина на епруветата
76. l (mm) – Должина на епруветата по издолжување
77. α – Ферит
78. γ – Аустенит
79. HB (daN/mm^2) – Тврдина по Бринел
80. S (mm^2) – Површина на отпечаток

1. Вовед

Денешната глобализација се карактеризира со забрзан процес на движење на капиталот, ресурсите, производите и услугите, резултирајќи во сосема нова структура на светската трговија, економските и финансиските текови, интернационализација на производството и забрзување на техничко-технолошкиот развој. Спојувањето, односно заварувањето како значаен производствен процес од машинството не заостанува во технолошкиот развој, односно константно се воведуваат нови процеси и технологии за заварување кои би резултирале во намалување на производствените трошоци, а притоа механичките карактеристики на заварените споеви да се на прифатливо ниво согласно техничките стандарди [1].

Кај заварувањето, терминот извор на топлина генерално се однесува на видот на термичката алатка, која се користи во процесот на заварување со топење на основните материјали со доминантно дејство на топлинска енергија. При движење на изворот на топлина по определена траекторија на заварување, дел од неговата енергија односно топлина се распределува во заварувачката зона помеѓу елементите кои се спојуваат. Количеството на внесена топлина треба да биде доволно големо со цел да обезбеди топење на определена зона на основниот, а понекогаш и на додатниот материјал, со што се формира растопена зона која по процесот на зацврстување претставува заварен спој. Денес, постојат различни видови на извори на топлина за заварување, со што се обезбедува голем број на можности за спојување на два или повеќе исти или разнородни материјали, и истите се класифицираат според стандард DIN 1910, прикажани на слика 1.1 [23].



Слика. 1.1. Поделба на процесите на заварување со топлинска енергија [23]

Конвенционалниот процес на заварување со топлива електродна жица под заштитен гас, позната под името GMAW (Gas-shielded Metal Arc Welding) е најприменет процес за заварување на конструктивен челик во голем број инженерски области како што се бродоградбата, градежништвото, рударската и процесната опрема, и постројки за производство на енергија [2].

Следствено кај овој процес на заварување се појавуваат голем број на новитети, кои придонеле за негово усовршување [3]. Една од нив е автоматизираното хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак, кое преку комбинирање на предностите на два различни процеси, заварување со ласерски сноп – LBW (Laser Beam Welding) и полуавтоматско заварување со топлива електродна жица под заштитен гас GMAW или електролачно заварување со полнета жица – FCAW (Flux-Cored Arc Welding) претставува одлична замена за конвенционалните процеси за заварување [4].

Иако заварувањето со топлива електродна жица под заштитен гас е широко применет процес на заварување поради неговите предности како што се едноставно ракување, ниските трошоци за имплементација и користење, можноста за исполнување на големи коренски растојанија, формирање на завари со голем попречен пресек и високи стапки на депониран додатен материјал, сепак брзината на заварување во овој процес на заварување е ограничена поради формирање на дефекти во заварот [5]. Дополнително, при процесот на заварување во работниот материјал се внесува значителна количина на топлина, што резултира во формирање на поголема зона под влијание на топлина (ЗВТ) и појава на непосакувана микроструктура [6]. Од друга страна, процесот на заварување со ласерски сноп (LBW) поради концентрираниот извор на топлина обезбедува длабоки и тесни завари при големи брзини на заварување, мало ЗВТ подрачје и мали деформации [7]. Овој процес на заварување, како и другите процеси на заварување има свои недостатоци, високиот степен на одведување на топлина од заварувачката зона што доведува до зголемена тврдина и намалена жилавост на заварот, кој понекогаш не ги исполнува минималните критериуми за прифаќање на механичките карактеристики [8].

Хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак – HLAW (Hybrid Laser Arc Welding) ги комбинира предностите на двата индивидуални процеси на заварување, LBW и GMAW или FCAW, што резултира во процес на заварување кој се карактеризира со големи брзини на заварување, ниско ниво на внесување на топлина и голема длабочина на пенетрација во основниот материјал, како и можност за контрола на хемискиот состав на растопената мешавина на основен и додатен материјал [9]. HLAW процесот добива се поголемо внимание поради тоа што ги компензира ограничувањата на индивидуалните LBW и GMAW процеси, го намалува интензитетот на одведување на топлина од заварувачката зона и ги зголемува димензионалните толеранции за изработка на жлебовите за заварување, овозможува зголемени брзини на заварување, намален број на премини во самиот процес на заварување, зголемена длабочина на пенетрација и насочен завар со мала зона под влијание на топлина и стабилен заварувачки процес [10, 11, 12].

Процесот на хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак за прв пат е воведен кон крајот на 1970-тите од страна на W. M. Steen [15], а процесот бил наречен „електролачно-засилено ласерско заварување“. Резултатите од неговото истражување посочиле на јасни предности од комбинирањето на двата процеси на заварување, сепак, по успешното демонстрирање, развојот на HLAW доживува забавен раст, поради недостаток на сигурен ласерски извор со поголема моќност, операторско-стручни лица за ракување со процесот, како и нецелосно познавање на самиот процес [16]. Кон крајот на 1980-тите, со развојот на сигурни и конзистентни индустриски ласери со голема моќност е привлечено вниманието на професорите и истражувачите од индустријата за подобрување на HLAW процесот со цел

негова примена во секојдневното производство [15]. Неколку недостатоци на поединечните процеси се елиминирани, како на пример целосно растопување на рабовите од работните материјали кои се спојуваат и намалување на степенот на рефлексија кој претставува проблем за успешно заварување [16]. Во 1990-тите, HLAW процесот забележува поголем развој поради достапноста на ласерите со голема моќност, гасните CO_2 ласери кои како активен медиум најчесто користат гасна смеса од CO_2:He:N_2 [17, 18]. Првиот индустриски систем за заварување со ласерски сноп и електричен лак е воведен во 2000 година од страна на Fraunhofer ILT, Германија, во индустријата за производство на резервоари за масло [19]. Подоцна овој систем е инсталиран во различни индустрии, вклучувајќи ја автомобилската индустрија, бродоградбата, металната индустрија за производство на цевки и итн. Во 2001 година од страна на светски познатата компанија Fronius презентирано е хибридното заварување со прототип на компактна заварувачка глава за роботизиран процес, во која се интегрирани ласерскиот сноп од Nd:YAG ласер и електричниот лак од MIG/MAG (Metal Inert/Active Gas) уред за заварување [23, 95].

Хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак поради своите предности во однос на другите процеси на заварување овозможува широка примена во голем број индустрии, почнувајќи од автомобилската до тешката металуршка индустрија, при тоа заварувајќи различни видови на челици и широк опсег на дебелини од 1 (mm) до 50 (mm). Барањето за ласерски извор со голема моќност се намалува со употреба на секундарен извор на топлина, како електричниот лак и на тој начин директно се влијае врз намалување на трошоците за инсталирање на самиот процес [20, 28].

И покрај фактот што во денешно време HLAW е прифатен од страна на поголем број индустрии и се извршени незначителен број на истражувања поврзани со предностите од негова имплементација, неговиот процент на застапеност во производствените линии е далеку од задоволувачки, главно поради почетните високи трошоци за имплементација, дополнителните безбедносни мерки, и големиот број на параметри кои се инволвирани во процесот и недоволно истражените меѓусебни влијанија, а со тоа и целокупниот процес на заварување е недоволно разработен. Прецизна студија [21] на сите параметри кои се користат кај HLAW е основа за стабилноста и повторливоста на процесот и добивање на завар со одлични механички и димензионални карактеристики при најниски оперативни трошоци.

Согласно Bunaziv et al. [20] HLAW овозможува заварување на големи дебелини со еден премин, но во одредени случаи се јавуваат сериозни несовршености во заварот и висока тврдина поради погонската енергија на изворите и големите брзини на заварување резултирајќи во брзо одведување на топлина од зоната на заварување, до зголемена брзина на ладење. Главните несовршености кои се појавуваат при изведба на сочелен завар во еден премин од режимот на HLAW е појава на прокапини од кореновата страна на заварот или пак недоволна пенетрација во коренот поради несоодветен избор на параметрите на заварување, како и поради неповолна динамика на растопената маса во заварувачкото купатило.

Следствено, HLAW претставува комплексен процес на заварување поради комбинирањето на два извори на топлина во единствена растопена мешавина, заедничко заварувачко купатило [22], што доведува до зголемување во бројот на параметри. Покрај тоа, вредностите на параметрите кои биле идеални за секој процес поединечно, голема е

веројатноста да не се оптимални за успешно заварување со HLAW процесот, бидејќи нивното меѓусебно влијание е доста големо.

Врз основа на досегашните истражувања и искуства, параметрите кај HLAW не се доволно специфицирани како би се овозможило условите точно да се репродуцираат за определена операција. Последователно, корисникот со цел да добие најдобри резултати од одреден експериментален HLAW процес, претходно треба да изврши оптимизација на параметрите за заварување. Иако кај HLAW се сретнуваат голем број параметри кои доведуваат до зголемена комплексност на процесот, сепак може да се констатира дека моќноста на ласерскиот сноп и брзината на заварување се особено значајни за карактеристиките на заварот. Од друга страна, брзината на заварување е директно поврзана со количеството на внесена топлина по единица должина на заварот од што зависи и длабочината на проварување и севкупниот квалитет на заварот. Дополнителен параметар од кој зависи квалитетот на заварот и неговите механички карактеристики е вториот извор на топлина односно вредностите на јачината на струјата на заварување и нејзинот сооднос со моќноста на ласерскиот сноп. Генерално, овие три параметри се особено значајни за ефективноста на целокупниот процес и квалитетот на заварот.

Ефективноста на HLAW во голема мера зависи и од основниот материјал кој се заварува. HLAW процес најчесто се користи за заварување на конструктивни челици кој се карактеризира со помала рефлективност т.е. абсорбира поголема енергија во материјалот во споредба со алуминиумот, бакарот и другите обоени материјали, што придонесува за подобра ефикасност на самиот процес [20]. Конструктивниот челик припаѓа на групата феритни челици кои се карактеризираат со добра заварливост и нивната главна поделба е врз основа на механичките карактеристики кои ги поседуваат. Основен показател за квалитетот на заварот изведен со хибридно електролачно заварување кај овој тип на челик претставуваат неговите механички карактеристики кои треба да бидат поголеми од механичките карактеристики на основниот материјал, и истите се определуваат со механички испитувања.

Механичките испитувања се основен индикатор врз основа на кои се определуваат механичките карактеристики на заварите. Резултатите од испитувањата на механичките карактеристики на заварот изведен со HLAW се појдовна точка врз основа на која може да се анализираат и утврдат влијанијата на параметрите на заварување врз карактеристиките на заварот. Врз основа на анализа на резултатите и воведување на математичка теорија на експеримент може да се определат највлијателните параметри кај HLAW и нивните меѓусебни влијанија и да се дефинира математички модел во определен експериментален простор [23].

Претходно беше напоменато дека HLAW е процес на заварување кој ги комбинира предностите на двата индивидуални процеси на заварување, LBW и GMAW. Со користење на овие предности HLAW претставува одлична можност и ветувачки процес за заварување на дебели елементи >10 (mm) во еден премин, притоа доведувајќи до значително намалување на оперативните трошоци и термичкото оптоварување во споредба со GMAW процесот на заварување. Оваа техничка можност е заначително интересна за производителите на тешки челични конструкции кои бараат нови можности и опции за замена на конвенционалните процеси на заварување.

Дополнително, повеќето истражувања посочуваат дека распределбата на топлината при процесот на заварување е термички феномен од кој зависи формата и микроструктурата на завареният спој, односно условите на доведување и одведување на топлина за време на заварувањето директно влијаат на механичките карактеристики на заварот [24].

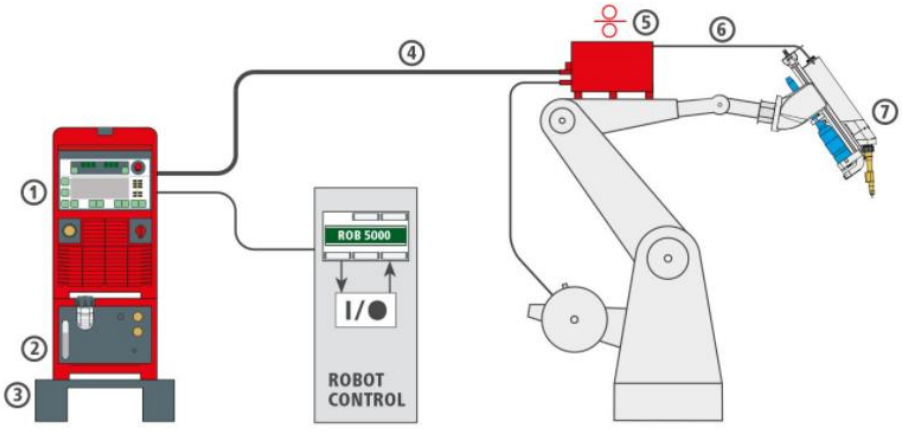
Согласно наведеното, HLAW во еден премин на елементи со дебелина поголема од >10 [mm] на конструктивен челик е недоволно истражувано, и сè уште постојат непознати фактори за влијанието на параметрите на хибридно заварување врз карактеристиките на заварот изведен во еден премин кај елементи изработени од конструктивни челици со поголеми дебелини. Овој технички податок за хибридното заварување, паралелно проследен со зголемената глобална побарувачка за заварени челични конструкции е главната мотивација за поттикнување на ова истражување.

Во оваа докторска дисертација се истражува влијанието на параметрите на хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак врз механичките карактеристики на хибриден завар на конструктивен челик, подетално, во истражувањето ќе се изврши анализа на влијанието на моќноста на ласерскиот сноп, јачината на струјата на заварување и брзината на заварување врз механичките карактеристики на хибриден завар изведен во еден премин со HLAW на конструктивен челик. Врз основа на произнесеното преку повеќефакторен експеримент и имплементација на математичко моделирање ќе се истражи ефективноста и ефикасноста на HLAW на конструктивен челик.

2. Состојба на познавања од истражуваната област – преглед на литература

Последната деценија во развојот на хибридното заварување е карактеристична по усовршување на техниката за заварување кај која ласерскиот сноп и електричниот лак истовремено, и на исто место, дејствуваат врз заваруваниот дел.

Развиени се најразлични процеси на хибридни заварувања со ласерски сноп и електричен лак. Ласерскиот извор е гасен CO_2 ласер со континуирано дејство или цврст Nd:YAG ласер со пулсно т.н. квазиконтинуирано дејство. Другиот енергетски извор, во зависност од видот и дебелината на заваруваниот материјал, е пулсирачки електричен лак т.е. процес на заварување со електричен лак MIG/MAG или TIG (Tungsten inert gas) или пак со плазмен лак, прикажано на слика 2.1 [23, 25].



1. Уред за заварување
2. Систем за ладење
3. Конзола
4. Електричен проводник
5. Роботизиран уред за доведување на жица
6. Електричен проводник за ел.жица
7. Интегрирана заварувачка глава

Слика 2.1. Систем за хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак [25]

2.1. Параметри кај хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак – HLAW

Параметрите кај хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак потребно е детално да се разберат со цел да се определи како тие влијаат на целокупниот процес на заварување. Постојат голем број на различни трудови поврзани со правилно и оптимално подесување на параметрите на хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак. Во оваа точка со цел да се изврши подетална анализа се земени во предвид истражувања од различни трудови поврзани со влијанието на параметрите на заварување врз механичките карактеристики на хибриден завар изведен со HLAW на конструктивен челик.

Шематскиот приказ на слика 2.2, јасно прикажува, дека како и кај останатите процеси на заварување, можностите кои може да се постигнат со HLAW зависат од правилниот избор и подесувањето на парметрите на заварување [26].

Слика 2.2. Шематски приказ на параметрите на хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак [26]

2.1.1. Видот на ласерскиот извор и неговата моќност

Фокусираниот ласерски сноп припаѓа на групата на извори на топлина за заварување со највисока густина на енергија. Една од најважните карактеристики на топлинските извори на ласерскиот сноп е неговата излезна моќност P_L [W], брановата должина (λ) на емитираната светлина и специфичната моќност на изворот, како мерка за фокусирање или квалитетот на ласерскиот сноп [27].

Изборот на видот на ласерот е клучен бидејќи кај хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак, моќноста на ласерскиот извор е основниот топлински извор од кој зависи ефикасноста на целокупниот процес [29]. Ласерскиот сноп како основен извор на топлина заедно со електричниот лак го сочинуваат вкупното количество на топлина кое се внесува во основниот материјал. Оваа зависност јасно се пресметува со изразот:

$$Q_H = Q_L + Q_A = \frac{P_L \, x \, \eta_L \, x \, 60}{1000 \, x \, V_t} + \frac{P_A \, x \, \eta_A \, x \, 60}{1000 \, x \, V_t} \quad (2.1)$$

каде што, P_L (kW) е моќност на ласерскиот извор,

P_A (kW) е моќност на електричниот лак,

V_t (mm/min) е брзина на заварување, додека

η_L и η_A се коефициенти на ефективност со вредност од 0,7 за ласерскиот сноп и 0,8 за електричнот лак [7].

Моментално, најчесто користени типови на ласери со висока моќност се гасните CO_2 ласери со континуирано дејство или цврстите Nd:YAG ласери со квазиконтинуирано дејство. Сепак, во поново време се достапни и користат и други видови на цврсти ласери за заварување Yb:YAG диск и Yb Fiber ласер кои се карактеризираат со голема излезна моќност и одличен квалитет на ласерскиот сноп. Петтиот тип на ласер кој се препорачува за заварување е високо-моќен диоден ласер [23]. Најважните карактеристики на овие ласерски извори, како што се брановата должина на емитираната светлина, излезната моќност, ефективната моќност, теоретскиот квалитет на ласерскиот сноп, мобилноста-подвижноста на изворот и временските интервали за сервис се дадени во табела 2.1 [27].

Табела 2.1. Споредба на карактеристики на ласерските извори [27]

	CO_2	Nd:YAG ласер (напојување со лампа)	Nd:YAG ласер (напојување со диода)	Диск ласер	Fiber ласер	Диоден ласер (споен со оптичко влакно)
Активен медиум	гасен смеса	стаклена прачка	стакела прачка	кристална плоча	оптичко влакно	полупроводник
Емитирана бранова должина (μm)	10.6	1.06	1.06	1.03	1.07	0.808–0.98
Ефикасност на искористување на енергијата (%)	10–15	1–3	10–30	10–20	20–30	35–55
Максимална излезна моќност (kW)	20	6	6	8	5	6
BPP при 4kW (mm·mrad)	4	25	12	8	0.35	44
M^2 при 4kW	1.2	75	35	6	1.1	150
Типичен дијаметар на оптичкото влакно при 4kW (mm)	–	0.6	0.4	0.1–0.2	0.03–0.1	0.4
Мобилност	ниска	ниска	ниска	ниска	висока	висока
Интервал за одржување (h)	1000	500	100000	>25000	>30000	>25000

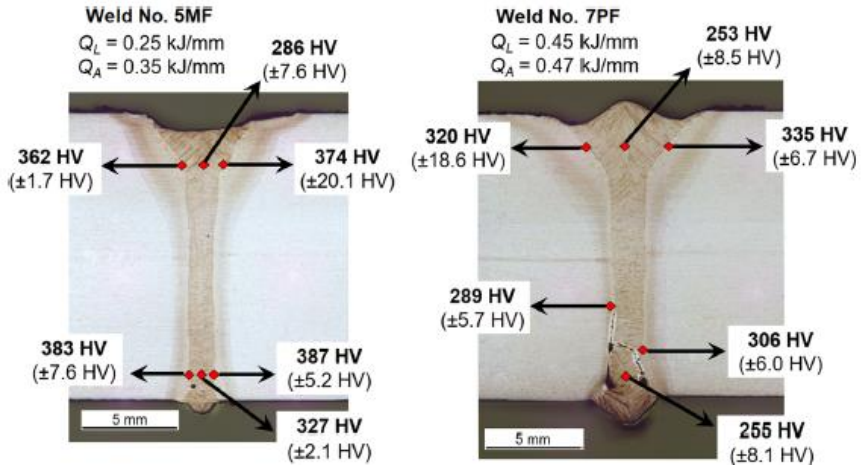
Моќноста и брановата должина се најважните параметри според кои се избира видот на ласерот. Пенетрацијата зависи право пропорционално од моќноста на ласерот и затоа посакуваната пенетрација претставува основен параметар според кој се избира моќноста на ласерот. Други параметри кои треба да се земат во предвид се брзината на заварување, густината на топлинскиот флукс, рефлективноста на основниот материјал и формата на подготовка на рабовите за заварување. Во продолжение се разгледувани предностите и недостатоците на различните типови на ласери [27].

Кај **гасните CO_2 ласери** како активниот медиум е мешавина CO_2, N_2 и He во најразличен сооднос, но најчесто CO_2:He:N_2 = 5:1:1. Карактеристично за нив е големата бранова должина на емитираната светлина 10,60 (μm), додека ефективната моќност се движи во граници од 12 (%) до 14 (%). Максималната моќност која што може да ја генерираат моменталните комерцијлани гасни ласерски системи при континуирано дејство е 25 (kW), но тие може да бидат и со пулсно дејство, при тоа моќноста ќе биде помала. Поради големата бранова должина, рефлективната оптика треба да биде изработена од златно обложени или повеќеслојно бакарно обложени подлоги, и другиот недостаток поврзан со долгата бранова должина е поврзана со високиот степен на рефлективност на метали. Сепак, со користење на хелиумот како заштитен гас кој поседува голем јонизирачки потенцијал се намалува или целосно избегнува овој проблем [23, 27].

Цврстите Nd:YAG ласери и полупроводничките ласери се одликуваат со кратка бранова должина од 1.06 (μm), што овозможува ласерскиот сноп да биде спроведен низ оптички влакна и да се фокусира со обични леќи што е од голема важност при роботизирано заварување и заварување на сложени тридимензионални структури. Тие припаѓаат на групата ласери со квазиконтинуирано дејство и имаат ограничена можност од 6 (kW) и понизок квалитет на ласерскиот сноп кој не дозволува голема густина на топлинскиот флукс, односно ефективната моќност не надминува 5 (%) [27]. Иако квалитетот на ласерскиот сноп е значително понизок од квалитетот на ласерскиот сноп обезбеден со гасен CO_2 ласер, Nd:YAG ласерите може да постигнат слични големини на местото на фокусот во споредба со CO_2 ласерите поради помалата бранова должина. Дополнително, апсорпцијата кај повеќето метали е значително подобрена и не постои значајна интеракција помеѓу инцидентното ласерско зрачење и генерираната пареа од испарување на металот при процесот на заварување и намалување на ласерскиот флукс кој стигнува до заварувачкото купатило. Следствено, како заштитен гас може да се користи чист инертен гас аргон (Ar) или гасна смеса на база на аргон во замена за хелиум (He).

Fiber ласери и Fiber диск ласери се карактеризираат со ниски трошоци за одржување, голема излезна моќност, одличен квалитет на ласерскиот сноп и висок коефициент на корисно полезно дејство кое може да надмине и над 25 (%). Овие предности се резултат на користење на диоди како светлосен извор и истите развиваат моќност над 20 (kW) [27].

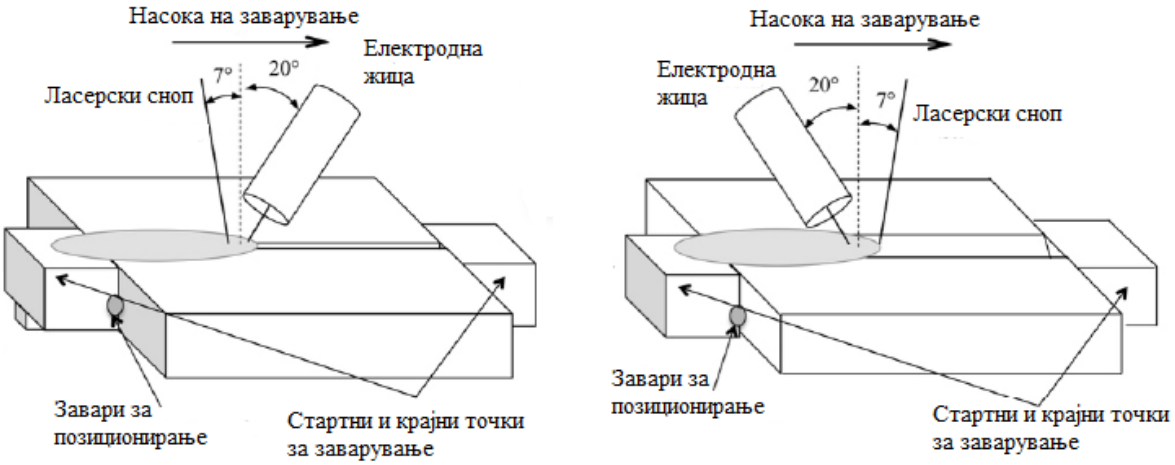
При заварување со ласерски сноп со зголемување на моќноста на изворот се предизвикува зголемена пенетрација на заварот [34]. Кај HLAW овој феномен е поизразито видлив, поради тоа што рефлективноста на работниот материјал – металот се намалува поради тоа што металот се загрева од електричниот лак [35]. За хибридно заварување на тенки елементи или елементи со различна дебелина се користи комбинација на квазиконтинуирано дејство на Nd:YAG ласерски сноп и MIG/MAG електричен лак со потенка жица и пониска струја на заварување. Додека за заварување на подебели елементи се користи комбинација на гасен континуиран CO_2 ласерски сноп со MIG/MAG електричен лак [23, 33]. Хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак е соодветно за спојување на материјали со дебелини во опсег од 0,7 до 50 (mm). Додека спојувањето на релативно тенки материјали е добро изучено поради неговата примена во автомобилската индустрија, но кога се работи за материјали со дебелина поголема од 10 (mm) се јавуваат несовршености и појава на зголемена тврдина и треба дополнителни истражувања [18]. Согласно Bunaziv [7] извршено е хибридно заварување со Disc ласер со моќност од 16 (kW) на конструктивен челик со дебелина од 12 (mm) до 15 (mm) во еден премин, попречни пресеци на хибридните завари со дебелина од 15 (mm) изведени со различна моќност на ласерскиот сноп и електричниот лак се прикажани на слика 2.3.



Слика 2.3. Попречен пресек на хибриден завар изведен со различна моќност на топлински извори [7]

2.1.2. Редослед и растојание помеѓу изворите на топлина

Постојат две основни взаемни положби на ласерскиот сноп и електричниот лак при процесот на хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак. Иако двата извори на топлина истовремено дејствуваат во иста точка од работниот материјал, сепак нивната поставеност може да биде на два начини, поточно ласерскиот извор да биде првиот извор кој го загрева работниот материјал или пак електричниот лак да биде првиот извор кој го „напаѓа“ работниот материјали, прикажано на слика 2.4. [18].

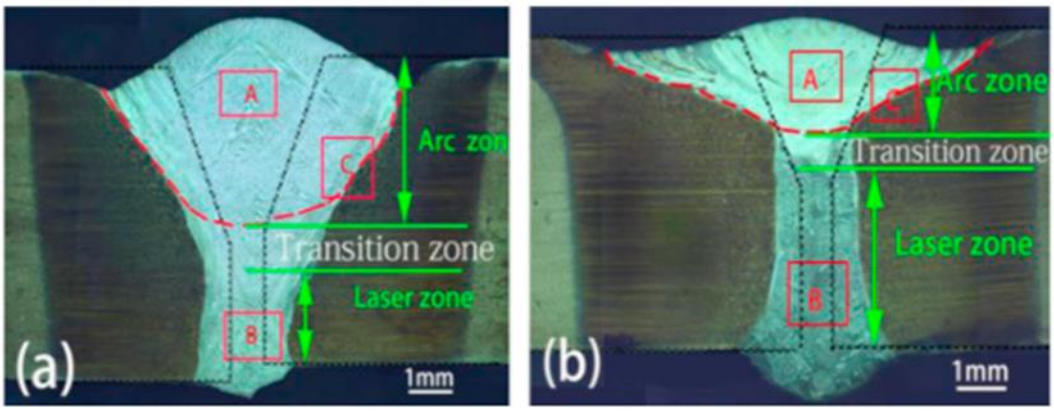


Слика 2.4. Распоред на поставеност помеѓу двата топлински извори кај хибридно заварување [36]

Распоредот на изворите на топлина, зависат од повеќе фактори, како што се: карактеристиките на материјалот кој се заварува, моќноста на изворот на ласерскиот сноп и електричниот лак [37]. Исто толку значајно е и растојанието помеѓу ласерскиот сноп и електродата. Големината на ова растојание влијае на степенот на раздвојување на процесите на ласерско заварување и заварување со електричен лак под заштитен гас. Раздвојувањето на процесите може да влијае на процесот на стврднување на растопениот метал и структурата на

хибридниот завар [36]. Значително зголемување на растојанието ќе доведе до создавање на два посебни процеси на заварување, кои иако првенствено делуваат како еден процес, преку металографската анализа на заварот може да се утврди дека тие засебно преминале во цврста состојба гледајќи по длабочината на заварот. Растојанието помеѓу топлинските извори влијае на количеството на внесената топлина во материјалот, длабочината на пенетрација, начинот на пренос на додатниот материјал и формата на заварот. Во пракса растојанието помеѓу ласерскиот сноп и електродата се движи во границите од 0 (mm) до 5 (mm) во зависност од карактеристиките на основниот материјал, моќноста на ласерот и брзината на заварување [37]. При паралелна поставеност на топлинските извори или многу мало растојание може да се јави проблем на апсорпција на ласерската енергија од страна на електричниот лак, што делумно го блокира ласерскиот сноп резултирајќи во помала пенетрација [10, 18, 37].

Според истражувачот Bunaziv [7] геометријата на хибридниот завар и неговите механички карактеристики зависат од поставеноста на топлинските извори. Количеството на внесена топлина по единица должина на заварот е незначително поголемо кога електричниот лак е прв во насока на заварувањето, а при тоа се добива завар со конусна форма, со зголемена затегнувачка јакост и намалена жилавост (слика 2.5a). Од друга страна, кога ласерскиот сноп е прв топлински извор во процесот на заварување, електричниот лак е постабилен и доведува до зголемување на пенетрацијата и до 10 (%) при заварување со гасен CO_2 ласер, а попречниот пресек на заварот е во форма на „коктелска чаша“ (слика 2.5b).



а) водечки електричен лак, б) ласерски сноп како водечки извор

Слика 2.5. Попречен пресек на хибриден завар кај конструктивен челик изведен со различен редослед на изворите на топлина[39]

Врз основа на претходни експериментални истражувања, заварот изведен со HLAW е поделен на две зони, прикажано на слика 2.6 [4]: горна-широка зона и долна-тесна зона, кои соодветно се дефинирани како зона на електричниот лак и зона на ласерски сноп [39]. Кај двете зони е евидентна разликата во однос на микроструктурата, распределба на легирачките елементи и микро тврдината [40]. Зоната на ласерски сноп во однос на зоната на електричен лак има поситнозрнеста структура, поголема микро тврдина и пониска содржина на легури. Овие разлики се резултат на температурната разлика, кристализацијата и притисокот на лакот врз заварувачкото купатило помеѓу ласерската зона и растопената зона [26, 41, 42].

Слика 2.6. Зони на завар изведен хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак [10]

2.1.3. Позиционирање на фокусот на ласерскиот сноп

Ласерите како топлински извори користат систем за фокусирање со цел намалување на површината на која дејствува топлината, односно зголемување на топлинскиот флукс. За оваа цел се користи систем од собирни леќи од различни материјали во зависност од брановата должина кои имаат своја фокусна точка. Растојанието до оваа фокусна точка или познато како фокусно растојание директно влијае на длабочината на пенетрација на заварот [43]. Фокусот на ласерскиот сноп се менува при пенетрацијата во заварувачкото купатило. Волуменот на заварувачкото купатило кај хибридното заварување е многу поголем отколку кај ласерското заварување поради фактот што се користи додатен материјал и електричен лак кој дејствува на поголема површина. Дополнително конвексноста на лицето на заварот поради додатниот материјал влијае на фокусот на ласерскиот сноп. Според одредени експериментални истражувања [44] фокусното растојание кај хибридното заварување со комбинација на CO_2 ласер и MIG во однос на ласерското заварување без додаден материјал е намалено за 0,7 (mm).

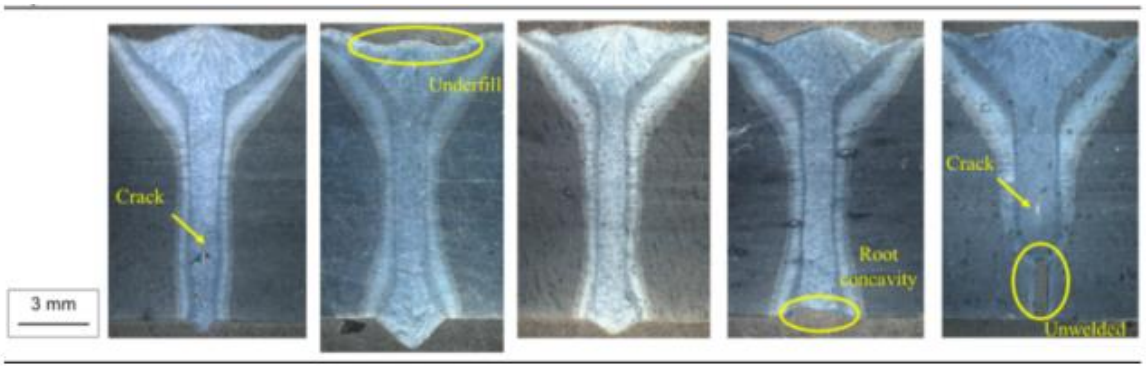
Од страна на истражувалот Ishida [44] извршено е хибридно заварување на плочи од конструктивен челик со дебелина од 12 (mm) и широчина на грло од 0,5 mm, со различно позиционирање на фокусот од ласерскиот сноп генериран од диск ласер со моќност од 8 (kW) до 14 (kW) и при тоа се извршени мерења на густина на енергијата при различно фокусно растојание и моќност на ласерот, дадени во табела 2.2.

Табела 2.2. Густината на енергија при различно фокусно растојание и моќност на ласерскиот сноп [44]

		Густина на енергија (kW/mm^2)					
Фокусно растојание		-12 mm	-9 mm	-6 mm	-3 mm	0 mm	6 mm
Моќност на ласерскиот сноп	8 kW	4	8	16	47	113	14
	10 kW	5	10	20	59	141	18
	12 kW	11	11	24	71	169	22
	14 kW	8	13	28	83	197	25

Максимална пенетрација на заварот се постигнува кога фокусот е позициониран под површината на работниот материјал, односно густината на енергија е најголема во точката на фокус поради тоа што во неа е најмала површината врз која дејствува ласерскиот извор. Количеството на внесена топлина во материјалот е поголемо кога фокусот на ласерскиот сноп е со негативни вредности, односно е фокусиран во дебелината на материјалот. Промената на фокусното растојание од негативни вредности према позитивни доведува до нецелосна пенетрација и зголемен волумен во горната зона на заварот, додека големи негативни вредности предизвикуваат грешки во заварот во форма на пукнатини (слика 2.7).

Фокусно растојание	-12 mm	-12 mm	-6 mm	-6 mm	+6 mm
Моќност на ласер	8 kW	12 kW	8 kW	14 kW	8 kW



Слика 2.7. Попречен пресек на хибриден завар изведен со различен фокус на ласерскиот сноп и моќност на ласерскиот извор [44]

2.1.4. Агол на поставеност на електродната жица

Аголот на поставеност на електродата првенствено влијае на пенетрацијата на заварот при HLAW процесот, односно од тој агол зависи струењето на заштитниот гас и на тој начин директно се влијае на апсорпцијата на ласерската енергија [45]. Генерално, ласерскиот сноп односно ласерската глава е насочена нормално во однос на работниот материјал со цел да се постигне поголема пенетрација. Аголот на кој што е поставена електродата во однос на површината на работниот материјал е во рангот $45^o \div 65^o$ со што се намалува должината на лакот и се фокусира т.е. насочува ласерскиот сноп во растопената мешавина, наречена топлинска дамка [10]. Иако ласерскиот сноп односно ласерската глава е насочена нормално во однос на работниот материјал со цел да се постигне поголема пенетрација, сепак, доколку се заваруваат материјали со висок степен на рефлексија, а со цел да се избегне оштетување на ласерската глава поради рефлектираниот сноп, се користи одреден агол на наклон кој е потребно да се разликува од аголот на електродата [46]. Релацијата помеѓу аголот на поставеност на електродната жица и длабочината на пенетрација на заварот е потврдена и во спроведеното истражување на авторот Ghazvinlool [47].

Во истражувањето на Ghazvinlool [47] извршено е хибридно заварување на HQ130 челик со дебелина од 5 (mm), дијаметар на жица 1.6 (mm) во заштитна атмосфера од активен гас CO_2 при различен агол на поставеност на електродата од 65°, 75° и 85° во однос на основниот материјал. Според добиените резултати, јасно се согледува дека со зголемување на аголот на

поставеност се наголемува и длабочината на пенетрација на заварот, односно коренот на заварот е непосредно изложен на топлината од електричниот лак. Од друга страна со намалување на аголот на електродната жица се намалува ефективност на електричниот лак врз кореновиот премин, односно електродата е насочена во насока на заварување што доведува до поголема контактна површина помеѓу електричниот лак и основниот материјал и формирање на конусен завар (слика 2.8).

Агол на поставеност 65°
Длабочина на пенетрација 3,81 (mm)

Агол на поставеност 75°
Длабочина на пенетрација 5,38 (mm)

Агол на поставеност 85°
Длабочина на пенетрација 7,50 (mm)

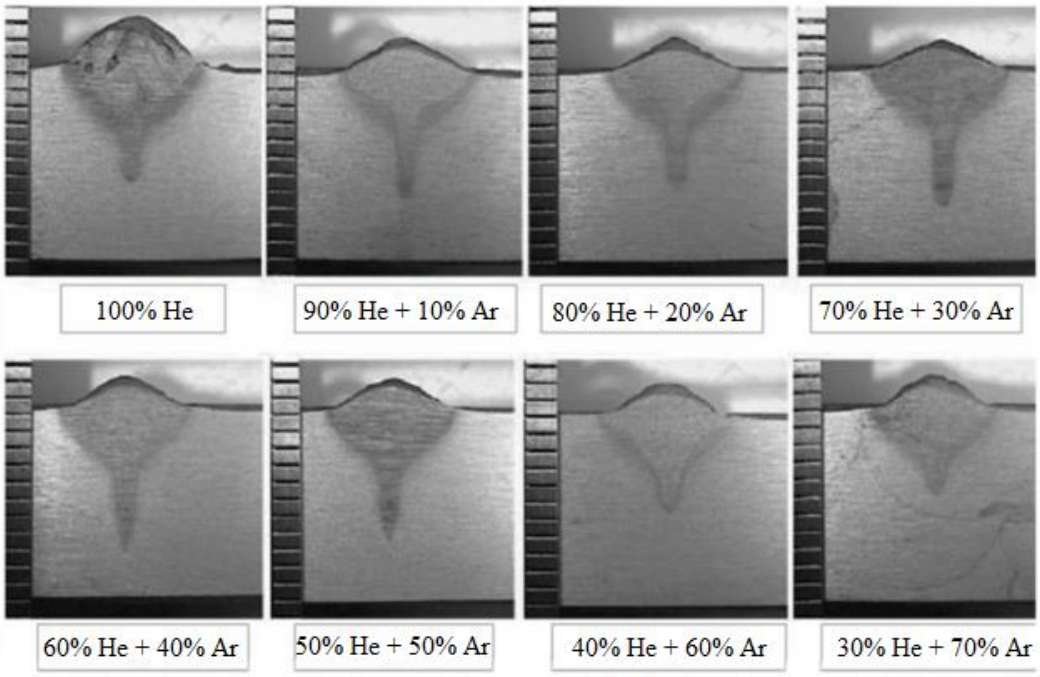
Слика 2.8. Попречен пресек на хибриден завар изведен со различна поставеност на електродна жица во однос на основен материјал [47]

2.1.5. Вид на заштитен гас и количина на проток

Заштитните гасови главно се користат за заштита на заварувачкото купатило од интеракција со околната атмосфера. Употребата на заштитен гас и неговиот состав влијае врз карактеристиките на електричниот лак, формата на заварот и зоната под влијание на топлина [48]. Kaj HLAW, заштитниот гас игра основна улога во стабилноста на електричниот лак, односно стабилноста на процесот на заварување [49], а со тоа и врз квалитетот на завареният спој [22]. Генерално, заштитниот гас кој се користи во HLAW содржи голем процент на инертен гас како аргон (Ar) и хелиум (He) [18], но исто така може да се користи јаглероден моноксид (CO) или јаглероден диоксид (CO_2) во зависност од видот на материјал, ласерскиот извор и параметрите на електричниот лак [50]. При користење на гасен CO_2 ласер поради поголемата бранова должина често се појавува апсорпција на ласерската енергија и намалување на ласерскиот флукс кој стигнува до заварувачкото купатило [10]. Со користење на хелиумот како заштитен гас кој поседува голем јонизирачки потенцијал се избегнува овој проблем, поради тоа вообичаено како заштитен гас при хибридно заварување со CO_2 ласер се користи мешавина на аргон, хелиум и кислород [10, 37]. Употребата на хелиум обезбедува подлабока пенетрација, аргонот ја подобрува стабилноста на лакот, додека употребата на кислородот (O) во мали количини до 5 (%) го намалува распрскувањето и подобрува начинот на пренос на растопените капки од додатниот материјал [4, 51]. Начинот на пренос на растопениот додатен материјал е влијателен параметар за стабилен и повторлив заварувачки процес, кај хибридното заварување се препорачува пренос со пулсен лак во однос на кус лак или глобуларен пренос, поради тоа што предизвикува помала турбулентност на растопените капки, а со тоа се намалува потребата од дополнителна обработка во околината на заварот [18]. При користење на ласери со релативно пократки бранови должини, апсорбцијата на ласерот од страна на гасната плазма е

незначително. Така што, при употреба на цврсти Nd:YAG ласери, Fiber и диск ласерите, изборот на заштитниот гас зависи само од барањата за заштита и стабилност на лакот [50].

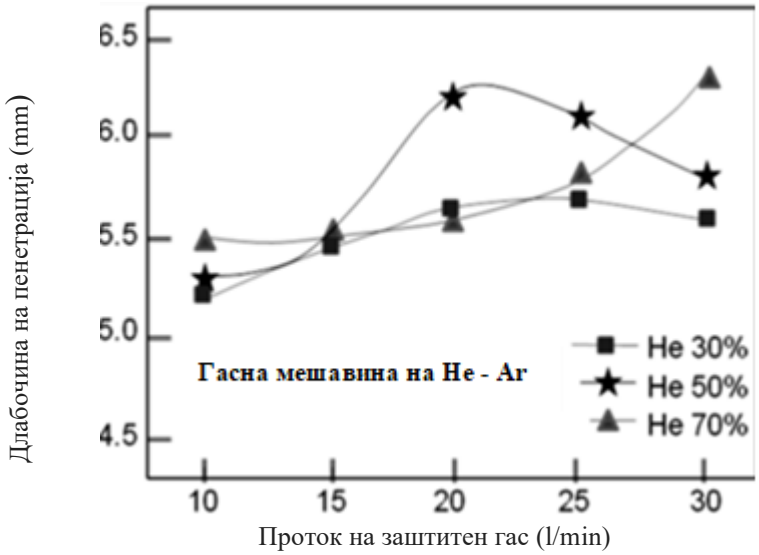
Според истражувачот Kah [22] при површинско HLAW заварување на конструктивен челик со дебелина од 8 (mm) со користење на 12 (kW) гасен CO_2 ласер и MIG/MAG уред со моќност од 500 (A) значително може да се воочат ефектите од користење на различни соодноси на заштитна мешавина на аргон (Ar) и хелиум (He) (слика 2.9). Анализирајќи ги резултатите се согледува дека со намалување на количината на хелиумот под 40 (%), значително се намалува и длабочината на пенетрација на ласерскиот сноп. Следствено е јасно дека потребно е најмалку 50 (%) хелиум во гасната смеса со цел да се спречи апсорбција на ласерската енергија при користење на гасен CO_2 ласер.



Слика 2.9. Попречен пресек на хибриден завар изведен со различни соодноси на гасна мешавина на аргон и хелиум [22]

Покрај составот на заштитниот гас, количината на протокот на заштитен гас е исто така важен параметар кај HLAW. За да се добие најдлабока пенетрација, а со тоа и најголема ефикасност, постои оптимална количина на проток за секој константен состав на заштитен гас. Премногу мал проток не може доволно да ја потисне плазмата индуцирана од ласерот, додека пак преголем проток може да направи турбуленции на површината на заваруваčкото купатило, а со тоа намалувајќи го резултатот од заштитата врз купатилото [22].

Ефектот на количината на проток на заштитен гас врз пенетрацијата кај хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак при различен сооднос на He-Ar е прикажно на слика 2.10, односно составот на заштитниот гас влијае на оптималниот проток, при што најдобри резултати при хибридно заварување со CO_2 ласер се добиваат при заштитен гас со најмалку 50 (%) хелиум и проток од 20 (l/min) [52].

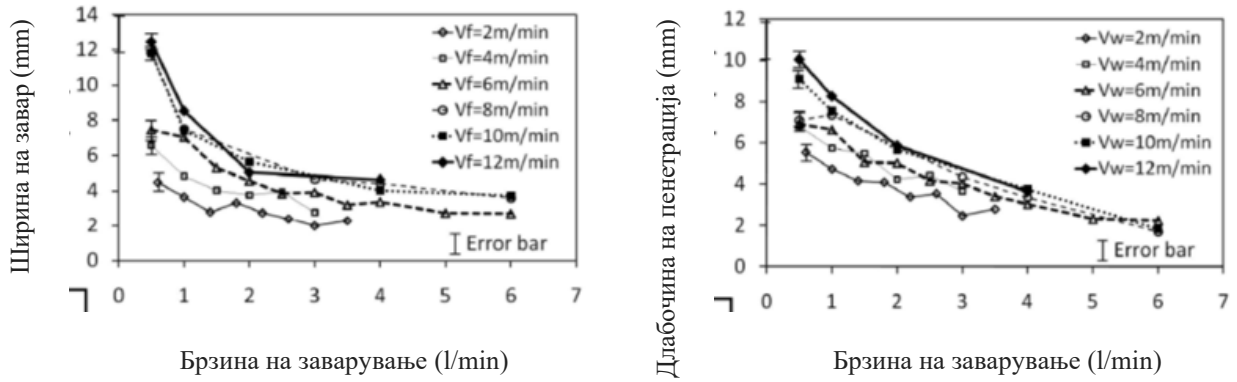


Слика 2.10. Ефект на количината на проток врз пенетрацијата кај хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак со различен сооднос на He-Ar [39]

2.1.6. Брзина на заварување

Една од основните предности на хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак е големата брзина на заварување, која е директно поврзана со пенетрацијата на завареният спој. Доколку се задржат сите параметри константни, брзината на заварувањето значително влијае на квалитетот на заварот, однесувањето на електричниот лак и стабилноста на процесот [18]. При тоа треба да се внимава дека и моќноста на ласерот кај HLAW заварувањето влијае идентично, поради што за одредена моќност на ласерот, постои брзина на заварување над која квалитетот на заварот и стабилноста на процесот брзо опаѓаат [7, 38, 53].

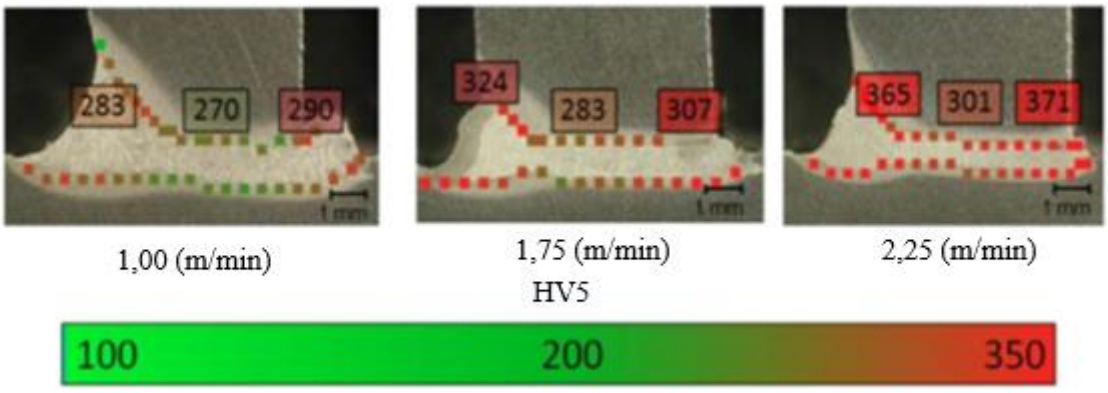
Зголемување на брзината на заварување е обратно пропорционална од ширината на заварот и неговата пенетрација (слика 2.11) [9]. Пенетрацијата на заварот се зголемува кога брзината на заварување се намалува, поради тоа што внесувањето на топлина по единица должина на заварот е поголемо [54]. Исполнувањето на поголемо растојание помеѓу елементите кои се спојуваат се подобрува при помали брзини на заварување, но при тоа доведувањето на додатен материјал (електрода) да остане непроменет [55]. Односот помеѓу брзината на заварување и стапката на доведување на додатен материјал директно влијае на стабилноста на растопената мешавина и формирање на заварот, а со тоа и на стабилноста на целокупниот процес [15]. Од друга страна големите брзини на заварување доведуваат до побрз циклус на загревање и ладење на работниот материјал, што може да резултира во металуршки дефекти во зоната на спојување и зоната под влијание на топлина. Сепак, зголемената брзина на заварување може ефикасно да ги намали заостанатите напони кои се јавуваат како резултат на термичкото оптоварување на материјалот [56]. Доколку процесот на заварување се изведува со премали брзини, пенетрацијата се зголемува, но исто така се зголемува и количината на растопен метал и можноста за прегревање, како и испарување на растопениот метал [57].



Слика 2.11. Ширина и пенетрација на заварот добиени со хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак во функција од брзината на заварување при различни брзини на доведување на додатен материјал [9]

Согласно истражувањата на Guen [9] може да се заклучи дека со зголемување на брзината на заварување кај HLAW заварувањето потребно е да се изврши подесување на останатите параметри, особено на брзината на доведување на додатен материјал и на тој начин да се запази бараната геометрија на заварот.

Дополнително со зголемување на брзината на заварување се намалува количината на внесена топлина во заварот, што резултира во зголемена тврдина и намалена жилавост на заварот, како и намалена пенетрација (слика 2.12) [58]. Врз основа на овие истражувања може да се заклучи дека иако зголемената брзина на заварување е препознатлива карактеристика кај HLAW заварувањето, потребно е да се обрне внимание на геометриските карактеристики на заварот и влијанието врз металуршките карактеристики кои резултираат со промената на брзина на заварување.



Слика 2.12. Тврдина кај Т-хибридни завари кај бродски челичен лим AH36 во зависност од брзина на заварување [58]

2.1.7. Брзина на доведување на додатен материјал

Соодветниот избор на брзината за додавање на електродна жица е критичен фактор за да се избегне недоволно растопен додатен материјал или пак премногу количина на додатен материјал. Зголемена брзина на доведување на додатен материјал, овозможува да се исполнат поголеми широчини на грлото и да се зголеми брзината на заварување [18]. Дополнително, за

зголемена брзина на доведување на додатен материјал потребно е и зголемена јачина на струјата за заварување како би се зголемила и стапката на депониран додаден материјал, а исто така должината на лакот да остане непроменета [43].

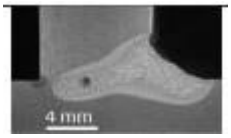
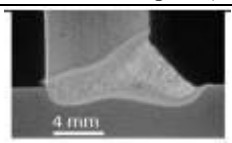
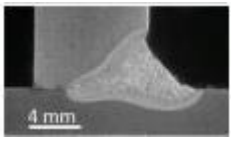
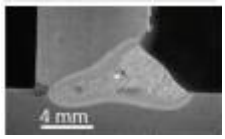
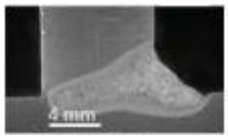
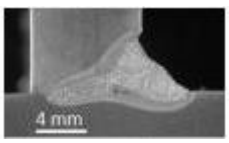
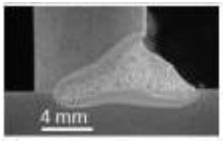
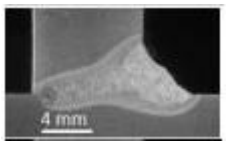
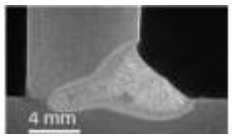
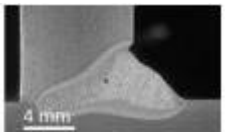
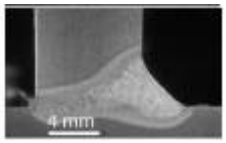
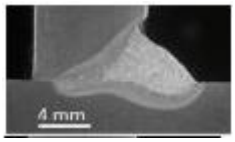
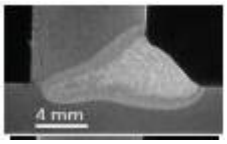
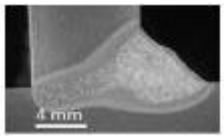
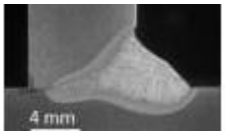
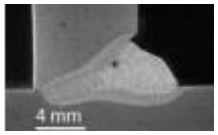
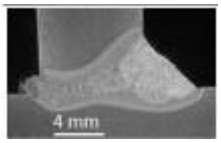
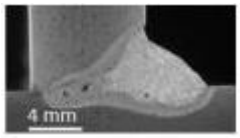
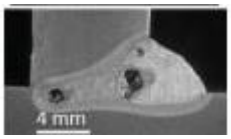
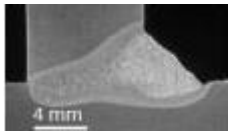
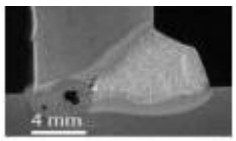
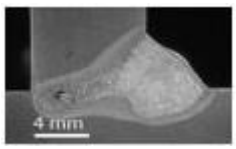
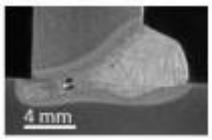
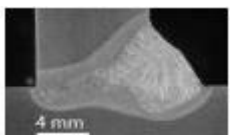
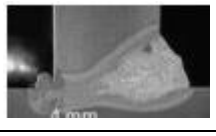
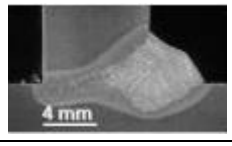
Согласно авторот Guen [9] формата на заварот зависи од количината на растопен материјал, односно од сооднос помеѓу брзината на заварување и брзината на доведување на додатен материјал. Следствено, ширината и длабочината на пенетрација на заварот се намалуваат со зголемување на брзината на заварување, додека димензиите на заварувачкото купатило т.е. нејзината ширина, должина и длабочина се зголемуваат со зголемување на брзината на додавање на додатен материјал (слика 2.11) [9].

Добиените резултати од истражувањата на авторот Salminen [58] јасно го покажуваат влијанието на брзината на доведување на додатниот материјал во однос на геометриските карактеристики на заварот, т.е. зголемување на големината на заварот, количината на депониран додатен материјал и појавата на дефекти при зголемени брзини на доведување на електродната жица (слика 2.13). Анализирајќи ги резултатите се согледува дека со зголемување на брзината на доведување на додатен материјал се зголемува пенетрацијата кај бродски челичен лим AH36, а истото се однесува и за ефективната длабочина на заварот се додека не се постигне целосна пенетрација. Од друга страна ширината на заварот во горна и долна зона константно се зголемува и откога ќе се постигне целосна пенетрација. После целосна пенетрација на заварот зголемување на брзината на доведување на додатен материјал не резултира во подобрување на квалитетот на заварот, и ова треба да се применува само во случаи кога се бара дополнителна количина на внесена топлина со цел да се контролира тврдината на заварот.

2.1.8. Влијание на јачина на струјата за заварување, напон на елекричниот лак и поларитет

Хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак носи со себе предизвици кои се разликуваат од оние кај GMAW заварување, а еден од нив е големата брзина на заварување. Следствено, треба да се води сметка за начинот на пренос на растопените капки за добивање на стабилен и повторлив заварувачки процес, поради тоа се препорачува заварување со пренос во млаз или пулсен лак во однос на кус лак или глобуларен пренос [18]. Генерално, кај HLAW заварувањето се користи пулсен лак, додека преносот во млаз се користи кога се бара поголема количина на внесена топлина во материјалот и при значително големи брзини на заварување [43].

Напонот на електричниот лак кај хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак има идентична функција како и кај GMAW заварувањето, односно преку зголемување или намалување на лакот се влијае на должината на електричниот лак. Поголема должина на електричниот лак доведува до поголема широчина на лицето на заварот, при тоа треба да се земе во предвид дека прекумерното зголемување на должината на лакот може да доведе до нерамномерна распределба на додатниот материјал особено при големи брзини на заварување [23, 43].

Брзина на доведување на додатен материјал (m/min)	Дијаметар на јадрото на оптичкото влакно: 200 (μm) Фокусно растојание 1,2 (mm) Моќност на ласер 8 (kW)	Дијаметар на јадрото на оптичкото влакно: 300 (μm) Фокусно растојание 1,2 (mm) Моќност на ласер 8 (kW)	Дијаметар на јадрото на оптичкото влакно: 600 (μm) Фокусно растојание 1,5 (mm) Моќност на ласер 10 (kW)
5,1			
6,5			
7,6			
8,9			
10,2			
11,5			
12,7			
14			
15,3			
16,6			

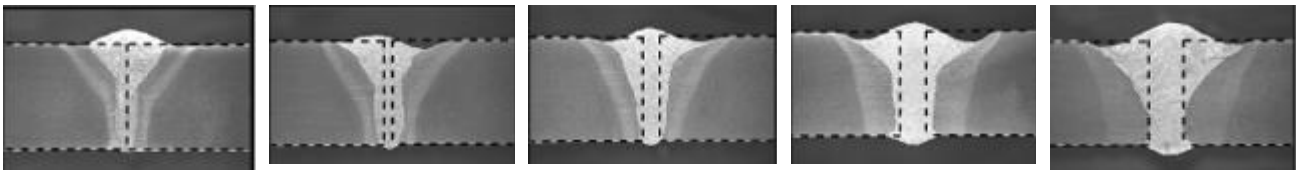
Слика 2.13. Попречен пресек на Т-хибриден завар изведен со различни брзини на доведување на додатен материјал [58]

Видот на електричната струја и поларитетот се исто така важен параметар од кој зависи стабилноста на целокупниот процес, поларитетот може да се менува во зависност од потребата за распределба на топлината помеѓу електродната жица и основниот материјал. Кај HLAW заварување најчесто се користи еднонасочна струја со индиректен поларитет односно електродата е со позитивен поларитет, а основниот материјал со негативен поларитет [18], добивајќи стабилен заварувачки процес со минимално распрскување на лакот [23]. HLAW заварување со директен поларитет или наизменична струја ретко се применува во индустријата поради ограничувачките можности на самиот процес [43].

2.1.9. Влијание на подготовка на жлебот за заварување и ширина на грлото

Споредувано со заварувањето со ласерски сноп каде што може да се заварат работни парчиња со ширина на грлото до интервал 0,2 ÷ 0,25 (mm), без да се појават видливи дефекти како што се нецелосни завари, хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак овозможува лесно да заварат грла со ширина од 1 (mm). Главни параметри кои ја определуваат стапката на депонирање додатен материјал во долната зона на заварот се односот помеѓу моќноста на ласерот и електричниот лак, растојанието помеѓу ласерскиот сноп и електричниот лак, брзината на заварување и брзината на додавање на додатен материјал [50].

Брзината на заварување може полесно да се зголеми при хибридното заварување кај парчиња со ширина на грлото до 1 (mm), поради тоа што помала ширина на грлото ја поедноставува пенетрацијата со тоа што поголема количина на растопен материјал стигнува до коренот на заварот [50]. Зголемувањето на ширината на грлото повеќе од 1 (mm) бара намалување на брзината на заварување и правилно подесување на останатите параметри на процесот [57]. Влијанието на ширината на грлото врз карактеристиките на заварот, како и врз останатите параметри се прикажани на слика 2.14 [57].



Широчина на грло 0 (mm)	Широчина на грло 0,5 (mm)	Широчина на грло 1,0 (mm)	Широчина на грло 1,5 (mm)	Широчина на грло 2,0 (mm)
P = 3,2 (kW)	P = 4,7 (kW)	P = 7,0 (kW)	P = 9,5 (kW)	P = 10,2 (kW)
V_Z = 1,4 (m/min)	V_Z = 1,6 (m/min)	V_Z = 1,8 (m/min)	V_Z = 1,7 (m/min)	V_Z = 1,1 (m/min)
Ve = 5 (m/min)	Ve = 8 (m/min)	Ve = 13 (m/min)	Ve = 18 (m/min)	Ve = 20 (m/min)

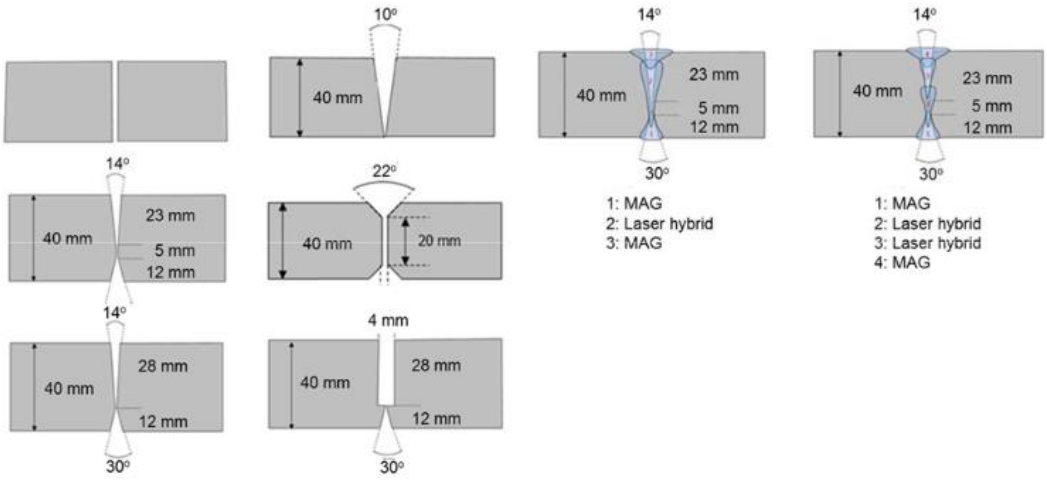
Слика 2.14. Попречен пресек на хибриден завар при различни широчини на грло [57]

Хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак овозможува да изврши исполнување на растојание помеѓу елементите и до неколку милиметри во зависност од дебелината на материјалот кој се спојува, моќноста на ласерот, брзината на заварување и

брзината на доведување на додатен материјал [59]. Истражувачот Shi [60] има изведено сочелно заварување на C/Mn челик со дебелина од 8 (mm), при тоа користејќи различни постапки односно хибриден паралелен CO_2 ласер, MAG заварувачки систем, класичен ласерски систем и ласерски систем за заварување со ладна жица. Врз основа на добиените резултати утврдено е дека со хибридното заварување, зјај со растојание од 1,4 (mm) успешно се заварува без посебно прилагодување на параметрите на заварувањето, додека за растојание до 1,6 (mm) потребно е да се изврши регулација на брзината на заварување или на брзината на доведување на додатен материјал, одржувајќи ги преостанатите параметри константни [60].

Дополнително, челни споеви со растојание до 2 (mm) може успешно да се заварат со HLAW преку намалување на брзината на заварување и зголемување на брзината на доведување на додатен материјал [57, 61]. Сепак, со зголемување на дебелината на елементите кои се спојуваат, се зголемува и можноста за појава на пори и топли пукнатини во заварот [62, 63]. Вториот тип на несовршености во заварот се покритични поради нивниот рамен и остар геометриски карактер [64, 65].

Истовремено, хибридното заварување побарува и соодветна подготовка на жлебот за заварување која во голем процент зависи и од карактеристиките на основниот материјал и неговата дебелина. За хибридно заварување на тенки челични лимови со дебелина до 8 (mm) нема потреба од подготовка на жлебот [50], додека за поголеми дебелини потребна е соодветна подготовка на жлебот во зависност од дебелината на основниот материјал [66]. Подготвените жлебови кај хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак генерално се карактеризираат со помал агол на закосување, тесни отвори кај грлото и поголеми висини на грлото во однос на заварувањето со електричен лак [67]. Исто така, количината на депонираниот додатен материјал зависи од видот на подготовка на жлебот. На сликата 2.15, прикажани се подготовки на жлебови за хибридно заварување на конструктивни челични плочи со дебелина од 40 mm, кои би можеле да бидат применети и за поголеми дебелини, како и потребата и ефикасноста од комбинирано заварување со повеќе премини со различни техники [67].



Слика 2.15. Видови подготовка на жлебови за хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак на поголеми дебелини [67]

Согласно истражувањето на авторот Nielsen [67] со правилен избор на ширината на грлото и соодветна подготовка на жлебот директно се влијае на ефективноста и ефикасноста на целиот процес при заварување на конструктивен челик. При изборот на подготовка на жлебот и ширината на грлото потребно е да се има во предвид со каква моќност располага ласерот, колкава би била брзината на доведување на додаден материјал и брзината на заварување.

2.1.10. Перформанси и индустриска примена на HLAW на конструктивен челик

Перформансите на хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак се мерат во насока на зголемената брзина на заварување, пенетрацијата на завареният спој, можноста за исполнување на поголемо растојание помеѓу елементите кои се спојуваат, а при тоа оперативните трошоци да бидат намалени [50]. Квалитетот на завареният спој изведен со HLAW заварувањето може да се процени во однос на подобрување на микроструктурата и механичките карактеристики и намалување или целосна елиминација на грешки при заварувањето [68]. Геометријата и металуршките карактеристикиос на завареният спој строго зависат од воспоставената рамнотежа на влијанието на ласерскиот сноп и електричниот лак [29].

Зголемувањето на соодносот резултира во потесна и подлабока зона на спојување, намалување на склоноста за раст на зрната и модифицирање на микроструктурата во зоната на спојување, додека со негово намалување се јавува поголема зона под влијание на топлина, како резултат на поширока распределба на топлинскиот флукс [18, 23]. Во услови кога се јавуваат константни вредности на моќност на ласерскиот извор и брзината на доведување на додатен материјал, повисоката моќност на електричниот лак предизвикува зголемување на широчината на растопениот метал, се додека не се достигнат некои максимални вредности [26]. Оваа појава главно се должи на фактот дека моќноста на електричниот лак се зголемува со зголемување на електричниот напон при константна брзина на доведување на додатниот материјал, така што должината на електричниот лак и неговиот дијаметар се зголемуваат и следствено се зголемува и површината на растопен метал [23, 26, 69]. Дополнително, подобрување на моќноста на електричниот лак предизвикува намалување на пенетрацијата на заварот кој зависи од лакот, поради тоа што се менува и режимот на пренос на растопен додатен материјал [70]. При соодветни параметри на заварување, хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак при повисок сооднос на енергија обезбедува поголема брзина на заварување, подобар облик и подобра микроструктура на завареният спој, а со тоа и директно да влијае на неговите механички карактеристики [70, 71]. За споредба HLAW процесот е за 50 (%) побрз од ласерското заварување [57].

Хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак овозможува заварување на тенки челични лимови со големи брзини кои се во интервал од 4-14 (m/min) [48, 73]. Истражувачите Katsuna и Chen [74] извршиле споредба на хибридно CO_2 ласерско MIG заварување на јаглероден челик во однос на ласерско заварување и откриле 30 (%) зголемување на брзината на заварување при HLAW процесот. Дополнително, резултатите на авторот Nielsen [66] покажуваат дека брзината на заварување се зголемила во опсег од 30-100 (%) при хибридно CO_2 ласерско MAG заварување на челик C/Mn (јаглерод/манган) во споредба со ласерско заварување со употреба на ладна полна жица. Брзината на заварување кај HLAW процесот може

дополнително да се зголемува до 200 (%) при заварување на тенки челични лимови, но при тоа елементите кои се спојуваат треба да се круто фиксирани, а растојанието помеѓу нив да не надмине повеќе од 0,6 (mm) [75]. Резултатите кои се добиени преку нумеричка симулација покажуваат дека со употреба на хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак на конструктивен челик се овозможува брзината на заварување со ласерски сноп да се зголеми повеќе од двапати односно од 1.2 (m/min) на 2.6 (m/min) за идентични параметри на ласерскиот сноп [76]. Воспоставување на мало растојание помеѓу елементите кои хибридно се заваруваат е корисно за економската исплатливост на процесот [72], за заварување на конструктивен челик со дебелина од 6 (mm) и CO_2 ласер MAG заварувачки систем, максимална брзина на заварување од 1.6 (m/min) се постигнува при растојание од 1 (mm) помеѓу елементите [57]. Хибридниот процес на заварување како резултат на користење дополнителен додатен материјал (електрода) обезбедува заварен спој со поголема затегнувачка јакост и дуктилност во споредба со класичното заварување со ласерски сноп кое се карактеризира со висок степен на одведување на топлина од заварувачка зона, а со тоа и на намалување на жилавоста на заварот [77].

Покрај за тенки материјали, HLAW заварувањето се користи и за заварување на подебели конструктивни челици и вообичаено се користи за дебелини кои може да се заварат со еден хибриден премин [50]. HLAW е процес на заварување кој овозможува поголема заварувачка пенетрација поради повисоката ефективна моќност која се пренесува на работниот материјал преку ласерскиот сноп и електричниот лак и подобра апсорпција на ласерската енергија во растопениот метал каде што истовремено дејствува електричниот лак [23, 78]. Конструктивен челик со дебелина до 15 (mm) успешно се заварува во еден премин при користење на хибриден 20 (kW) ласерски MAG систем и брзина на заварување од 1 (m/min) [79]. Конструктивните челици со дебелина од 30 (mm), исто така се заваруваат хибридно, со двоен премин, при тоа користејќи HyDRA (Hybrid welding with Double Rapid Arc) процес за заварување, каде што двата горилника за MAG заварување се поставени од двете страни на работниот материјал [80]. Успешно хибридно заварување на материјали со поголеми дебелини е возможно да се изведе, но при тоа заварувачкиот процес да се изведе во неколку премини, односно со повеќе слојно хибридно заварување и оптимално растојание помеѓу елементите кои се заваруваат [81, 82].

Табела 2.3. Влијание на HLAW параметри на заварување врз формата на заварот [83]

Параметар на заварување	**Пенетрација**		**Количина на депониран дод. м**		**Ширина на лице на заварот**		**Ширина на коренот на заварот**	
	Зголемување	Намалување	Зголемување	Намалување	Зголемување	Намалување	Зголемување	Намалување
Брзина на заварување	Намалување	Зголемување	Намалување	Зголемување	Намалување	Зголемување	Намалување	Зголемување
Моќност на ласерот	Зголемување	Намалување	Нема влијание	Нема влијание	Незначително влијание	Незначително влијание	Незначително влијание	Незначително влијание
Јачина на струјата	Зголемување	Намалување	Незначително влијание	Незначително влијание	Намалување	Зголемување	Зголемување	Намалување
Брзина на додавање на додатен материјал	Незначително влијание	Незначително влијание	Зголемување	Намалување	Незначително влијание	Незначително влијание	Нема влијание	Нема влијание
Напон на лакот	Нема влијание	Нема влијание	Нема влијание	Нема влијание	Зголемување	Намалување	Нема влијание	Нема влијание
Редослед на изворите на топлина	Незначително влијание	Незначително влијание	Нема влијание	Нема влијание	Прв ласер	Прв ел.лак	Незначително влијание	Незначително влијание

Со HLAW може да се заваруваат широк спектар на материјали, започувајќи од конструктивни и легирани челици, нерѓосувачки челици до обоени метали како алуминиум (Al), магнезиум (Mg), никел (Ni) и нивните легури и други [7, 23, 85].

Главна примена на HLAW процесот има во автомобилската индустрија и бродоградбата, каде што има голем број на метални компоненти кои треба да се заварат со цел да се формира лесна или тешка конструкција наменета за возила или бродови [24, 86].

Во автомобилската индустрија, компаниите како Audi AG и Volkswagen подолг период имаат имплементирано хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак во нивните производствени линии [87]. На конструктивната шасија од автомобил Volkswagen Phaeton изведени се вкупно 48 хибридни челни или аголни завари. Кај автомобилот Audi A8 кровната рамка и нејзините дополнителни делови исто така се изведени со хибридно заварување [88]. HLAW процесот е инсталиран и во Daimler AG и истиот резултирал во зголемување на продуктивноста преку зголемување на брзината на заварување и ефикасност во искористување на додатен материјал, истовремно одржувајќи добра пенетрација и подобрени металуршки карактеристики на завареният спој [73].

Германската бродоградбена компанија Mayer-Werft GmbH во сопствената производна линија има имплементирано HLAW процес за завруање на челични лимови и профили кои се вградуваат во бродовите. Со користење на CO_2 ласер 12 (kW) и 450 (A) GMAW заварувачки систем, успешно се изведуваат 12 (mm) аголни завари со должина од 20 (m) со намалена деформација, а на тој начин се елиминира дополнителната обработка за исправање на заварените делови. Кај овие заварени споеви изведени се испитувања на истегнување, свиткување, јакост, жилавост и замор и добиени се задоволувачки резултати [89]. Исто така, италијанската компанија за изградба на бродови Fincantieri SpA користи хибридно заварување на Nd:YAG ласер и MAG заварувачки систем, што им овозможило да ги надминат проблемите со деформации предизвикани од заварувањето и ефикасно исполнување на коренски растојанија помеѓу елементите кои се спојуваат [90]. Хибридното заварување со користење на fiber ласер е примарно развиено за потребите на бродоградбената индустрија и во него се интегрирани повеќе софтверски решенија за контрола на процесот и следење на квалитетот на завареният спој [91, 92].

Европскиот проект за економско и безбедно хибридно ласерско заварување на конструктивен челик има изведено хибриден челен завар со дебелина од 30 (mm) и хибриден аголен завар со дебелина од 20 (mm), при тоа користејќи двоен хибрид ласер MAG систем [80]. Исто така изведено е двострано хибридно заварување на конструктивен челик со дебелина од 30 (mm), обезбедувајќи целосна пенетрација во четири премини, што е помалку во споредба со тринаесетте премини изведени со GMAW [62].

Хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак се користи и во процесната индустрија за заварување на тенкосидни садови и ребрести цевки за садови под притисок. За оваа намена, компанијата Energoinstal SA го има применето HLAW процесот поради своите предности, како што се стабилен заварувачки процес, поголема толеранција во изработка на жлебовите за заварување, длабоката пенетрација и големата ефикасност [93].

2.2. Означување и поделба на челиците (конструктивни челици)

2.2.1. Означување на челиците

Основниот систем за означување на челици се заснова врз база на утврдени и релевантни стандарди кои опфаќаат: означување на челиците со бројки и букви (основни ознаки), бројчен систем за означување (број на челикот) и додатни ознаки [30, 31].

Основните ознаки се пропишани според стандардот EN 10027-1, и тие се сместени во две основни групи:

- челици кои се означуваат врз основа на нивната примена и механичките и физичките карактеристики, и
- челици кои се означуваат врз основа на хемискиот состав.

Ознаки за група 1

За челици кој се означуваат врз основа на нивната примена и механичките и физичките карактеристики, означувањето започнува со една од ознаките за употреба, кои ги имаа 11, а најупотребувани се следните:

- S – челици за конструкции,
- P – челици за опрема под притисок,
- L – челици за цевководи,
- E – челици за машински конструкции,
- R – челици за шини и во форма на шини,
- B – челици за армирање во бетон,
- D – рамни челици за ладно обликување.

После првата буквена ознака се наоѓа број кој ја означуваа вредноста на најмалиот напон на течење R_e (N/mm^2).

Пример: S355 (мин. R_e N/mm^2 за дебелина до 16mm)

Ознаки за група 2

За челиците кои се означуваат врз база на хемискиот состав ознаките се поделни во 4 подгрупи:

- **<u>Подгрупа 2.1</u> – Нелегирани челици со средна содржина на Mn < 1 (%)**

  Ознаката содржи азбучна ознака C (јаглерод), а потоа следи средната содржина на јаглерод помножен со 100.

  Пример: C45 (0.45x100)

- **<u>Подгрупа 2.2</u> – Нелегирани челици со средна содржина на Mn ≥ 1 (%), и легирани челици кај кои легирачките елементи < 5 (%)**

  Првата ознака е средната содржина на јаглерод во проценти помножена со 100, потоа следи хемиската ознака за елементот кој е карактеристичен за челикот, а потоа следат бројките за содржината на елементот во челикот помножен со одреден фактор, а факторите се:

  - 4 – за Cr, Co, Mn, Ni, Si, W
  - 10 – за Al, Be, Cu, Mo, Nb, Pb, Ta, Ti, V, Zr
  - 100 – за Ce, N, P, S
  - 1000 – за B

  Пример: 10 Ni14 (C-0.10%x100, Ni 3.5%x4); 28Mn6 (C-0.28%x100, Mn 1.5%x4)

- **<u>Подгрупа 2.3</u> – Легирани челици кој содржат барем еден легирачки елемент ≥ 5 (%)**

  Прва ознака е X, а потоа следи средната содржина на јаглерод во проценти помножена со 100, а потоа следат симболите на хемиските елементи кои му го даваат карактерот на челикот и броевите на средна содржина на легирачките елементи.

  Пример: X5CrNi18 8 (високолегиран челик со 0.05C%, 18%Cr, 8%Ni)

- **<u>Подгрупа 2.4</u> – Брзорезни челици**

  Првата ознака е HS, а потоа следат броевите на средна содржина на легирачки елементи по следниот редослед: W, Mo, V и Co.

  Пример: HS6525 (брзорезен челик со содржина 6%W, 5%Mo, 2%V и 5%Co)

Бројчаниот систем во стандардот EN 10027-2 за означување на челикот е поделен во неколку групи:

- 1.0000 до 1.0099 за основни челици,
- 1.0100 до 1.0299 за нелегирани конструктивни челици,
- 1.0300 до 1.0799 за нелегирани квалитетни челици,
- 1.0800 до 1.0999 за легирани квалитетни челици,
- 1.1000 до 1.1900 за нелегирани специјални челици,
- 1.2000 до 1.2900 за легирани алатни челици,
- 1.4000 до 1.4599 за хемиски постојани челици, огноотпорни челици.

2.2.2. Поделба на челиците

Правилната класификација на металните материјали е од суштинско значење за избор на соодветен процес на заварување и оптимизација на технолошките параметри. Техничкиот извештај ISO/TR 15608 претставува основа за класификација на метални материјали од гледна точка на нивната заварливост, и во него челиците се поделени во 11 групи, и тоа [32]:

- **Група 1**

  Челици со C ≤ 0.25%; Si ≤ 0.6%; Mn ≤ 1.8% и минимален напон на течење ≤ 275 (N/mm^2)

  - **1.1** Челици со напон на течење $R_{eH} \leq 275$ (N/mm^2)
  - **1.2** Челици со минимален напон на течење 275 (N/mm^2) < $R_{eH} \leq 360$ (N/mm^2)
  - **1.3** Нормализирани финозрнести челици со минимален напон на течење R_{eH} > (N/mm^2)
  - **1.4** Челици со подобрена отпорност на атмосферска корозија чии состави може да отстапуваат од групата 1

- **Група 2**

  Термомеханички валани финозрнести челици минимален напон на течење $R_{eH} \geq$ 360 (N/mm^2)

  - **2.1** Термомеханички валани финозрнести челици 360 (N/mm^2) < $R_{eH} \leq$ 460 (N/mm^2)
  - **2.2** Термомеханички валани финозрнести челици R_{eH} > 460 (N/mm^2)

- **Група 3**

  Калени и отпуштени финозрнести челици и челици зајакнати со таложење со исклучок на не'рѓосувачки челици, специфицирани во стандардите за челици со минимални напони на течење R_{eH} > 360 (N/mm^2)

  - **3.1** Калени и отпуштени финозрнести челици 360 (N/mm^2) < $R_{eH} \leq$ 690 (N/mm^2)
  - **3.2** Калени и отпуштени финозрнести челици R_{eH} > 690 (N/mm^2)
  - **3.3** Финозрнести челици зајакнати со таложење, освен не'рѓосувачки челици

- **Група 4**

  Нисколегирани челици со ванадиум Cr-Mo-(Ni) со Mo ≤ 0.7% и V ≤ 0.1%

  - **4.1** Челици со 0.75% ≤ Cr ≤ 1.5% и Ni ≤ 0.7%
  - **4.2** Челици со Cr ≤ 0.7% и Ni ≤ 1.5%

- **Група 5**

  Cr-Mo челици без ванадиум и C ≤ 0.35%

  - **5.1** Челици со 0.75% ≤ Cr ≤ 1.5% и Mo ≤ 0.7%
  - **5.2** Челици со 1.5% < Cr ≤ 3.5% и 0.7% < Mo ≤ 1.2%
  - **5.3** Челици со 3.5% < Cr ≤ 7.0% и 0.4% < Mo ≤ 0.7%
  - **5.4** Челици со 7.0% < Cr ≤ 10.0% и 0.7% < Mo ≤ 1.2%

- **Група 6**

  Високолегирани ванадиум Cr-Mo-(Ni) челици

  - **6.1** Челици со $0.3\% \leq Cr \leq 0.75\%$, $Mo \leq 0.7\%$ и $V \leq 0.35\%$
  - **6.2** Челици со $0.75\% \leq Cr \leq 3.5\%$, $0.7\% < Mo \leq 1.2\%$ и $V \leq 0.35\%$
  - **6.3** Челици со $3.5\% \leq Cr \leq 7.0\%$, $Mo \leq 0.7\%$ и $0.45\% < V \leq 0.55\%$
  - **6.4** Челици со $7.0\% \leq Cr \leq 12.5\%$, $0.7\% < Mo \leq 1.2\%$ и $V \leq 0.35\%$

- **Група 7**

  Феритни, мартензитни или таложно зајакнати не'рѓосувачки челици со $C \leq 0.35\%$, и $10.5\% \leq Cr \leq 30\%$

  - **7.1** Феритни не'рѓосувачки челици
  - **7.2** Мартензитни не'рѓосувачки челици
  - **7.3** Таложно зајакнати не'рѓосувачки челици

- **Група 8**

  Аустенитни не'рѓосувачки челици со $Ni \leq 35\%$

  - **8.1** Аустенитни не'рѓосувачки челици со $Cr \leq 19\%$
  - **8.2** Аустенитни не'рѓосувачки челици со $Cr > 19\%$
  - **8.3** Манган аустенитни не'рѓосувачки челици со $4\% < Mn \leq 12\%$

- **Група 9**

  Челици легирани со никел, $Ni \leq 10\%$

  - **9.1** Челици легирани со никел, $Ni \leq 3{,}0\%$
  - **9.2** Челици легирани со никел, $3{,}0\% < Ni \leq 8{,}0\%$
  - **9.3** Челици легирани со никел, $8{,}0\% < Ni \leq 10{,}0\%$

- **Група 10**

  Аустенитни – феритни (дуплекс) не'рѓосувачки челици

  - **10.1** Аустенитни – феритни не'рѓосувачки челици $Cr \leq 24{,}0\%$ и $Ni > 4{,}0\%$
  - **10.2** Аустенитни – феритни не'рѓосувачки челици $Cr > 24{,}0\%$ и $Ni > 4{,}0\%$
  - **10.3** Аустенитни – феритни не'рѓосувачки челици $Ni \leq 4{,}0\%$

- **Група 11**

  Челици кои се покриени во Група 1 кои содржат $0.30\% < C \leq 0.85\%$

  - **11.1** Челици од група 11 кои содржат $0.30\% < C \leq 0.35\%$
  - **11.2** Челици од група 11 кои содржат $0.35\% < C \leq 0.50\%$
  - **11.3** Челици од група 11 кои содржат $0.50\% < C \leq 0.85\%$

2.3. Нелегирани (конструктивни) челици и нивна заварливост

2.3.1. Нелегирани – конструктивни челици

Челиците се легури на железото или т.н. феритни материјали за кои по дефиниција во својата содржина има најмалку 50 (%) железо (Fe). Поради што, во опсегот на менување од најмалку 50 (%) на железо, може да се добијат најразлични легури со комбинација на хемискиот состав на разните легирачки елементи. Челиците претставуваат легури кои, воглавно, се одликуваат со висока деформабилност, висока јакост и некои други посебни карактеристики, кои им ги даваат легирачките елементи, како: електрична и топлотна спроводливост, возможност за обработка со леење, деформација, заварување, и итн. [94].

По дефиниција, чисто јаглеродни челици се оние кои содржат до 1 (%) јаглерод, помалку од 1,65 (%) манган, 0,6 (%) силициум, 0,6 (%) бакар и многу мала содржина на други елементи, помалку од 0,05 (%) сулфур и 0,04 (%) фосфор. За сите јаглеродни челици главно влијание на карактеристиките на челиците го носи количеството на јаглеродот. Порастот на неговото учество во челикот носи зголемување на јакоста и тврдината, а ја намалува жилавоста и деформационите карактеристики [94].

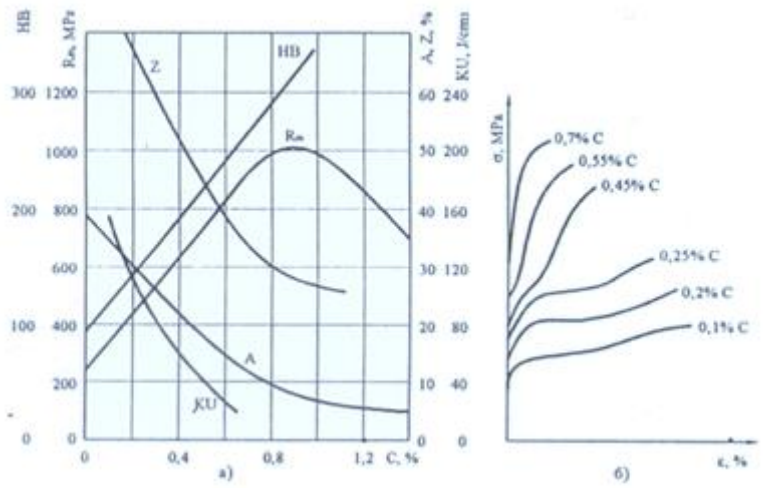
Според постоечките стандарди [30, 31, 32] сите јаглеродни челици според намената се делат на две основни групи: *конструктивни* и *алатни челици*.

Конструктивните челици се нелегирани јаглеродни челици и се доминантно најупотребувани материјали кај заварените конструкции. Нивната вообичаена примена е за изработка на: резервоари, носечки челични конструкции, фундаменти за машини, цевководи и општо заварени конструкции.

Овие челици спаѓаат во првите три групи (Група 1, 2 и 3) од техничкиот извештај ISO/TR 15608, односно тие се феритни челици кои се означуваат врз база на механичките карактеристики.

Кај *конструктивните челици* најмалото количество на јаглерод започнува да покажува забележително влијание на карактеристиките на челиците. Со зголемување на содржината на јаглеродот се зголемува содржината на перлитот односно цементитот поради што доаѓа до зголемување на затегачката јакост (R_m) и тврдоста (HB), додека издолжувањето (A) и жилавоста (KU) се намалуваат. Промената на механичките карактеристики во зависност од содржината на јаглеродот е дадена на слика 2.16a. Највисока јакост имаат перлитните челици т.е. при преминување во областа на надеутектоидни челици тврдоста продолжува да расте, меѓутоа јакоста се намалува.

Со зголемување на содржината на јаглерод, границата на развлекување како и затегачката јакост, се повеќе се зголемува, при што таа е се послабо изразена на кривата на издолжување (слика 2.16b) [95].



Слика 2.16. Влијание на содржина на јаглерод врз механички карактеристики на јаглероден челик [95]

Зголемената содржина на јаглерод ја отежнува машинската обработка и заварливоста на челикот. Содржината на јаглерод исто така влијае и на физичките карактеристики. Со неговиот пораст опаѓаат топлинската и електричната спроводливост, магнетниот преамбилитет драстично опаѓа, а исто така се намалува и отпорноста на корозија на самиот челик [94].

Со оглед на тоа што нелегираните челици се јаглеродни челици, има одредена поделба на нив и тоа: ниско, средно и високо јаглеродни челици.

Така наречените нискојаглеродни челици со содржина на јаглерод до 0,3 (%), во производната практика се нарекуваат уште и меки челици, бидејќи, се одликуваат со мала јакост и висока деформабилност. Тие не се затврднуваат со термичка обработка, освен со површинска термичка обработка. Како резултат на големата деформабилност, овие челици се употребуваат за правење на елементи со разни форми – профили [94].

Ладната обработка им ја зголемува јакоста, но им ја намалува деформабилноста. Елементите од овие челици се применуваат за носечките челични конструкции и голем број други конструкции за најопшта примена.

Посебен вид на јаглеродни челици претставуваат оние кои се применуваат за работа на ниски температури, посебно за заварени садови под притисок. Тие содржаат 0,2÷0,3 (%) C, повисока содржина на манган 0,7÷1,6 (%) Mn, 0,5÷0,6 (%) Si, и имаат финозрнеста структура. Главно да се напомене дека тие ја задржуваат јакоста и жилавоста до -50 (^oC).

Среднојаглеродните челици, кои содржат 0,3÷0,55 (%) C, ја зголемуваат тврдоста со термичка обработка. Овој процес важи за тенки елементи или за тенки слоеви од подебели елементи. Јакоста може да се зголеми со ладна обработка. Овие челици поседуваат добра комбинација на механичките карактеристики и поради тоа широко се применуваат во производната практика.

Високојаглеродните челици со содржина на јаглерод преку 0,55 (%) C, ја зголемуваат тврдоста со термичка обработка и се одликуваат со екстремна тврдост. Како последица на тоа

се применуваат за елементи изложени на триење, на пример за алати за машинска обработка, пили, калапи, водилки и сл. [94].

Табела 2.4 Табеларен приказ на механички карактеристики на четири вида конструктивни челици

Материјал Ознака	Дебелина (mm)	Re min. (N/mm^2)	Rm min. (N/mm^2)	Издолжување A (%)		Жилавост KV min (J) -20	
				лонги.	транс.	лонги.	транс.
S 235 JR	< 16	235	360-510	26	/	27	/
	> 16	225	360-510	25	/	27	/
S 275 JR	< 16	275	410-560	23	/	27	/
	> 16	265	410-560	22	/	27	/
S 275 NH	< 16	275	370-510	24	22	40	30
	> 16	265	370-510	23	22	40	30
S 355 J2G3	< 16	355	490-630	22	/	27	/
	> 16	315	490-630	20	/	27	/

Табела 2.5 Табеларен приказ на хемиски состав на четири вида конструктивни челици

Основен материјал	Хемиски елемент max. (%)												
	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	V	N	Ti	Al	Cu
S 235 JR	0.2	0.55	1.4	0.3	0.045	0.045	0.48			0.012	/	0.02	0.55
S 275 JR	0.22	0.15	/	/	0.04	0.04	/	/	/	0.012	/	/	0.55
S 275 NH	0.2	0.4	1.4	0.3	0.035	0.03	0.3	0.1	0.08	0.015	0.03	0.02	0.35
S 355 J2G3	0.22	0.55	1.6	0.3	0.035	0.035	0.48			0.012	/	0.02	0.5

Челици стандардизирани според стандардот EN 10025-2: 2019 металуршки гледано сочинуваат голема хетерогена група на конструктивни материјали. Таа хетерогеност се отчитува низ:

- Различни постапки и нивоа на дезоксидација (неумерени – FU; умерени – FN и потполно умерени FF челици)
- Различен хемиски состав, особено кога е во прашање содржината на C 0,17÷0,27 (%), S и P max. 0,055÷0,035 (%), Mn 1,5÷1,7 (%). Стандардот опфаќа и четири видови на челици за машински конструкции со дополнителна ознака J2G4 и K2G4. Тоа се ситнозрнести и микролегирани челици, за заварени конструкции со различна намена.
- Различна технологија на изработка и испорака во различна состојба (топловалани, нормализирано жарени и нормализирано валани)

За примена на заварени конструкции стандардот се повикува на оние челици кај кои е гарантиран хемискиот состав (max. вредности). Тоа не значи дека во практиката не смее да се применат и останати видови на челици, но во таков случај мора да се смета на преземање на технолошки мерки за зголемување на заварливоста, пример со челици за машински

конструкции со ознака Е, а со тоа и намалување на економичноста за изработка. Според тоа челиците наменети за заварување, според овој стандард, сведени се на три вида [96]:

- S235 (min. R_{eH} = 235 N/mm^2)
- S275 (min. R_{eH} = 275 N/mm^2)
- S355 (min. R_{eH} = 355 N/mm^2)

Овие видови челици може да се испорачаат како челици со следниот квалитет:

- JR, JRG1, JRG2, (min. жилавост 27J на +20 ºC)
- JO (min. жилавост 27J на 0 ºC)
- J2G3, J2G4, (min. жилавост 27J на -20 ºC)
- K2G3 и S355K2G4 кај S355 (min. жилавост 40J на -20 ºC)

Кај S355JO, S355J2G3, S355J2G4, S355K2G3 и S355K2G4 постои можност за дополнителна постапка за контролирање на содржината на Cr, Cu, Mo, Ni, Ti и V, што влијае на уситнување на зрната и другите елементи освен Al (JO, J2G3) и на микролегираните (J2G4 и K2G3 K2G4) тие припаѓаат на ситнозрнести челици [96].

Челиците JRG3, JRG4, J2G3, J2G4, K2G3 и K2G4 се потполно умерени челици (FF). Термичката состојба на испорака на плоснати челици (лимови, ленти) е N (нормализирано жарено и нормализирано валано). Ако се применува термичка обработка жарење, за намалување на напонот ограничувањата се T_z = 580ºC, не повеќе од еден час [97].

2.3.2. Заварливост на нелегирани – конструктивни челици

При процесот на заварување во металот на заварот и околу местото на спојување се случуваат низа процеси под влијание на внесената топлина од изворот на топлина, односно зголемените температури во околината на изворот на топлина предизвикуваат структурни промени, микроскопска и макроскопска нехомогеност на хемискиот состав во споредба со основниот материјал.

Во процесот на заварување во основниот метал се внесува голема количина локализирана топлина. Се создава нерамномерно топлинско поле, при кое температурата во основниот метал се менува од температура на топење во заварот, па до температура на околината во доволно оддалечените зони од заварот. Заостанатите напони од заварувањето настануваат во текот на ладењето на завареният спој и нивниот интензитет зависи од внесеното количество топлина, големината на постигнатата температура, природата на основниот метал, обликот и димензиите на елементите кои се заваруваат, процесот и технологија на заварување – заварливост [23]. Заварливоста на јаглеродните конструктивни челици се оценува врз основа на квалитетот на завареният спој, добиен според пропишана технологија на заварување. Генерално, не постои универзално прифатен метод за оценка на заварливост, туку се користат различни аналитички и/или експериментални методи. Аналитичките методи се засноваат на искуствено воспоставени математички модели за определување на т.н. еквивален на јаглеродот C_{ekv} или CE, а експерименталните методи се т.н. проби на заварливост.

Заварливоста на нелегираните, јаглеродни челици се одредува според вредноста на еквивалентната содржина на јаглеродот, C_{ekv}, односно CE. Колку е вредноста на еквивалентот на јаглеродот поголема, толку заварливоста на челикот е полоша и обратно. Челикот со поголема вредност на C_{ekv} е склон кон појава на топли и ладни пукнатини, па е неопходно при заварувањето да се применат мерки на претпазливост, како: предгреење, намалување на брзината на ладење и одржување на температурата меѓу слоевите при повеќеслојно заварување.

Во практиката за изработка на челични конструкции од конструктивен челик, зголемување на јакоста со додавање на C е ограничено поради ризик од настанување на ладни пукнатини во зоната под влијание на топлина на завареният спој како резултат на закалување (затврднување). Според тоа челици со содржина C < 0.25 (%) не се склони на закалување. Зголемување на јакоста, при намалување на C поради закалување, наметнува зголемено зајакнување на кристалната решетка со додавање на Mn, кој како елемент има помало влијание кон појава на закалување.

Процентот на содржина на C и Mn и останатите легирачки елементи кои влијаат на закалување и појава на ладни пукнатини во ЗВТ се оценува преку еквивалентот на јаглерод кој е опфатен во стандардот EN 1011-2 [98]:

$$CEV = CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15}\ (\%) \tag{2.2}$$

Оваа формула има примена за гранични вредности до: < 0.5 (%) C; < 1.0 (%) Mn; < 1.0 (%) Cr; < 3.5 (%) Ni; < 0.6 (%) Mo, далеку повисоки од нивото за нелегирани челици [97].

Според пресметаната вредност и содржината на јаглерод, конструктивни челици со CE ≤ 0.45 (%) и C ≤ 0.22 (%) се одликуваат со добра заварливост, додека за вредности на CE од 0.45 (%) до 0.60 (%) заварливоста е ограничена и за нејзино подобрување неопходни се дополнителни мерки, како предгреење и дополнителна термичка обработка. Челиците за кои вредноста на CE ≥ 0.6 (%) се сметаат за незаварливи.

Тешкотиите за постигнување на добра заварливост се зголемуваат со зголемување на дебелината на елементите кои се заваруваат. Оваа тешкотија произлегува не само од металуршките фактори, туку и од технолошката обработка пред заварувањето и заостанатите напони [23].

Заварливоста се подобрува со примена на предгревањето, со внесување топлина и загревање на заваруваниот дел на одредена температура непосредно пред заварувањето. Загревањето може да биде по целиот волумен, кај малите делови, или локализирано околу местото на заварување, кај деловите со големи габаритни димензии.

Со предгревањето може да се спречи или намали појавата на пукнатини, заостанати напони и деформации од заварувањето.

Температурата на предгревање зависи од повеќе фактори:

- карактеристиките, обликот и димензиите на основниот метал,
- видот на завареният спој и начинот на изведба на истиот,
- процесот на заварување,
- видот, обликот и димензиите на додатниот материјал.

Во практиката најприменуван метод за пресметка на температура на предгревање е метод на Seferijan [23, 94]:

$$T_p = 350\sqrt{[C] - 0.25}\,°C \tag{2.3}$$

каде што е:

[C] – вкупен еквивалент на јаглеродот

$[C] = [C]_h + [C]_d$

$[C]_h$ – хемиски еквивалент на јаглеродот, кој се пресметува според изразот:

$$360[C]_h = 360C + 40(Mn+Cr) + 20Ni + 28Mo \tag{2.4}$$

$[C]_d$ – еквивалент на јаглеродот на дебелината на основниот материјал и се пресметува според изразот:

$$[C]_d = 0.005d\,[C]_h \tag{2.5}$$

Според тоа, еквивалент на јаглерод (%) изнесува:

$$[C] = [C]_h + [C]_d = [C]_h\,(1+0.005\,d) \tag{2.6}$$

Табела 2.6. Примена на предгреење во зависност од CE [97]

Вид на челик	CE max.	Примена предгреење
S235JR S235JRG1 S235JRG2 S235J0 S235J2G3	max. 0.35 до 0.4 зависно од дебелина	Без предгреење
S275JR S275J0 S275J2G3	max. 0.4 до 0.44 зависно од дебелина	Ретко се применува
S355JR S355J0 S355J2G3	max. 0.45 до 0.49 зависно од дебелина	Предгреење: 80-150°C за дебелина поголема од d=20/25 mm

Предгреењето како постапка обавезно се применува при термичко сечење и заварување кое се изведува на температура на околина -10 (°C), а кај квалитетни челици ако температурата на околината е под -5 (°C). Предгреењето е со цел намалување на закалувањето во зоната под влијание на топлина и зависи од степенот на закалување, содржината на јаглерод и манган, како и на микролегирачките елементи (CE) и дебелината на материјалот (табела 2.6). При тоа треба да се има и пристап/податоци за содржината на јаглерод по дебелина [97].

Нелегирани конструктивни челици имаат задоволителна способност за заварување ако завареният спој има доволна способност за носивост. Во општ случај способност за носивост е доволна ако механичко-технолошките карактеристики на завареният спој одговараат на основниот материјал, без присуство на дисконтинуитет кој може да ја наруши сигурноста на конструкцијата.

Способноста за заварување на конструктивните челици зависи од поединечни и меѓусебе влијателни фактори како што се:

- Присуство на сегрегација.
- Анизотропност.
- Тенденција за крт лом (прекин).
- Тенденција за закалување.
- Дебелина.
- Тенденција кон стареење.

Сегрегација настанува како резултат на заробена нечистотија, како резултат на ова настанува зона збогатена со елементи кои неповолно влијаат на способноста за заварување (P, S, C). Присуството и содржината на сегрегација зависи од степенот и видот на дезоксидација и чистотата на челикот. При заварување можна е појава на ламиларни пукнатини, особено кај аголни завари, аголни споеви изведени со сочелен завар, и кај сочелни завари со големи дебелини. Современите челици, поради техничките можности се произведуваат доста чисти и појавата на топли пукнатини е значајно намалена.

Влијание на анизотропија, различни механички карактеристики во зависност од правецот на валање. Способност за деформација во правецот на валање е намалена поради слоевито распоредување на неметални вклучоци (сулфиди, силикати).

Хемискиот состав, посебно содржината на C во челикот > 0,23 (%), создава структура со зголемена тврдост и ниска жилавост во ЗВТ. Тенденцијата спрема закалување се оценува според еквивалентниот јаглерод CEV, со оваа формула се одредува дека челиците со CEV > 0,45 (%), кај ситнозрнести > 0.48 (%) поради подобрата жилавост условена од ситните зрна имаат тенденција за закалување и потребно е да се преземат одредени мерки против закалување.

Согласно наведеното произлегува дека способноста за заварување на овие челици се зголемува со степенот на дезоксидација, смалени вредности на CEV, зголемена способност за деформација во правец на затегнувачкиот напон, зголемување на жилавоста и намалување на дебелината [97].

Генерално, нискојаглеродните челици со содржина на јаглерод од 0.15 (%) до 0.20 (%) поседуваат одлична заварливост и не бараат посебна технологија на заварување, до 0.13 (%) C не се погодни за заварување со поголеми брзини поради појава на порозност, а за оние кај кои содржината на јаглерод е во горната граница на нискојаглеродни челици потребно е да се внимава еден или повеќе придружни елементи да не ја надминат дозволената граница за да не би се појавиле пукнатини во завареният спој, особено кај аголни завари.

Кај средно и високојаглеродните челици најголем проблем во заварувањето е намалување на пластичноста со зголемување на содржината на јаглерод. Намалената пластичност на челикот предизвикува зголемени заостанати напони во однос на нискојаглеродните челици. Овие напони се поради големите температурни разлики при процесот на заварување и големите брзини на ладење кои доведуваат до екстремно крта структура – мартензитна структура. Мартензитната структура е најкрта структура која може да се појави кај феритен метал и е чувствителна на пукнатини. Главна превентива е применување на предгревање или вршење на термичка обработка на завареният спој по процесот на заварување со цел да се зголеми хомогеноста помеѓу основниот материјал и завареният спој [94].

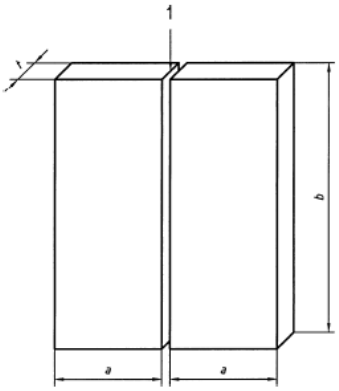
2.4. Процедура за испитување на заварени споеви изведени со HLAW

Процедурата за испитување на тест парчињата со кои треба да се докаже квалитетот и потврдат механичките карактеристики на заварен спој изведена со HLAW не се разликува значително во однос на процедурата за испитување на заварени споеви изведени со конвенционалните постапки. Сепак има одредени отстапки и дополнувања кои се пропишани во стандардот ISO 15614-14 – Спецификација и квалификација на процедури за заварување на метални материјали – Тестирање на процедурата за заварување – Дел 14: Хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак на челикот, никелот и легурите врз база на никел. Согласно стандардот ISO 15614-14, механичките испитувања се основен показател за квалитетот на завареният спој и за квалификација на технологијата на заварување и истите се извршуваат со разорување и без разорување [99, 100].

Изработката на тест парчињата – заварените проби потребно е да се изврши во согласно со пропишаните норми и стандарди за постапката на заварување како и видот на материјалот кој се заварува, при тоа да се внимава да бидат подготвени и изработени под услови кои во целост би одговарале на производството или монтажа на заварената челична конструкција. Со стандардот EN ISO 15614-14 се докажува валидноста на технологијата со кој се заварува пробата и врз негова база се издава WPQR (Welding Procedure Qualification Record). За да може целосно да се испитаат заварените проби, тие мора да поседуваат доволна големина што би обезбедила добра распределба на топлина и доволно површина за да може да се изработат сите барани епрувети. На заварените проби треба да биде и обележана насоката на валање со цел да се внимава кога ќе се изработуваат епрувети за жилавост од зоната под влијание на топлина [100].

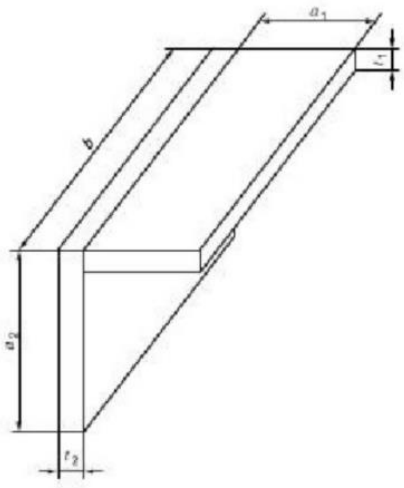
Дополнително, операторот на опремата на заварување со која се заваруваат испитните проби треба да биде сертифициран согласно стандардот EN ISO 14732, додека параметрите на заварување треба да бидат во согласност со прелиминарната спецификација на постапката на заварување pWPS (preliminary Welding Procedure Specification) [101, 102].

Димензиите и формата на заварените проби зависат од видот на заварот, за сочелен и аголен завар се прикажани на слика 2.17 и 2.18 [100].



Ознака	Содржина
1	Припрема на жлебот и позиционирање согласно pWPS
t	Дебелина на материјал
a	Минимум 150 mm
b	Минимум 350 mm

Слика 2.17. Димензии на тест парче за сочелен завар на плоча со делумна или целосна пенетрација [100]



Ознака	Содржина
l	Припрема на жлебот и позиционирање согласно pWPS
t	Дебелина на материјал
a1, a2	Минимум 150 mm
b	Минимум 350 mm

Слика 2.18. Димензии на тест парче за аголен завар со делумна или целосна пенетрација [100]

Заварените проби по процесот на заварување се испитуваат со разорување и без разорување со цел да се утврди квалитетот на завариот спој. Испитувањата во зависност од видот на заварот треба да биде во согласно со табела 2.7 [100].

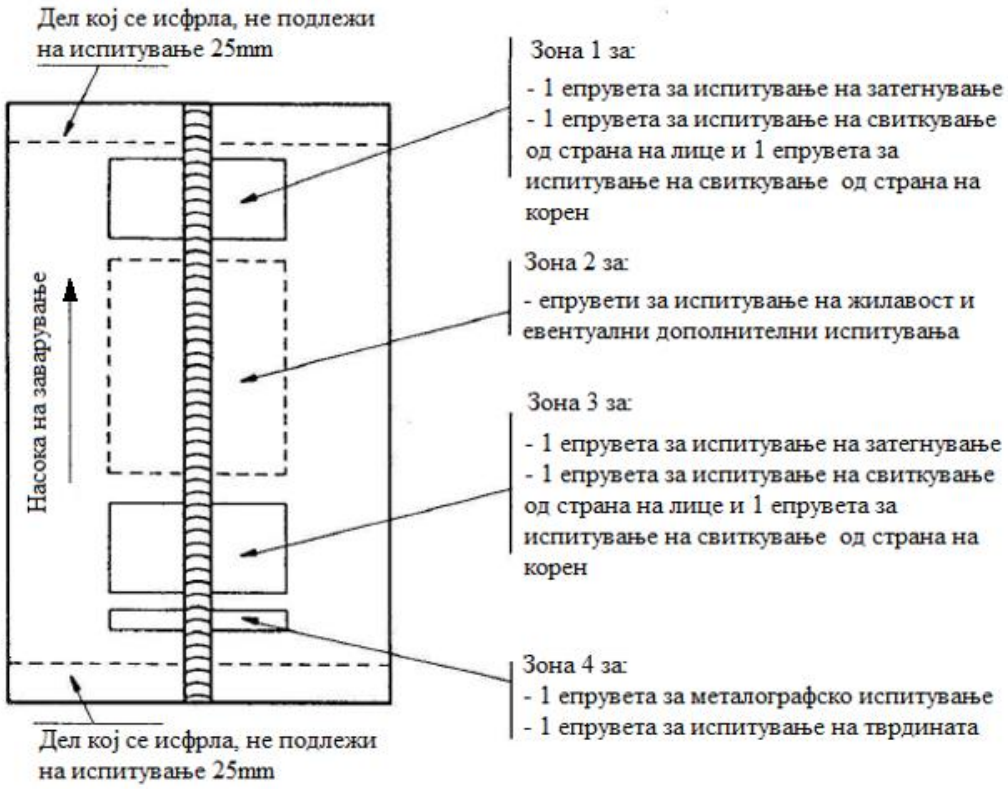
Пред да се започне со изработка на епрувети за испитување, заварените проби треба да се обележат и поделат на неколку локации во зависност колку и какви епрувети ќе бидат потребни за испитување на механичките карактеристики на завариот спој.

Следен чекор е расекување на заварените проби по можност со машински процес и дополнителна машинска обработка на епруветите до бараните димензии и форми. Доколку заварените проби се расекуваат со термички процес, исечените парчиња треба да имаат доволна ширина со цел ЗВТ да биде целосно машински обработена.

Епруветите за механичко испитување треба да се изработат откога заварената проба ќе биде испитана без разорување и доколку не се појават грешки се пристапува кон обележување на локации за изработка на епруветите. Доколку се појават грешки кои се прифатливи за испитување без разорување, може одредени епрувети да се изработат од други локации кои не се предвидени во стандардот [103].

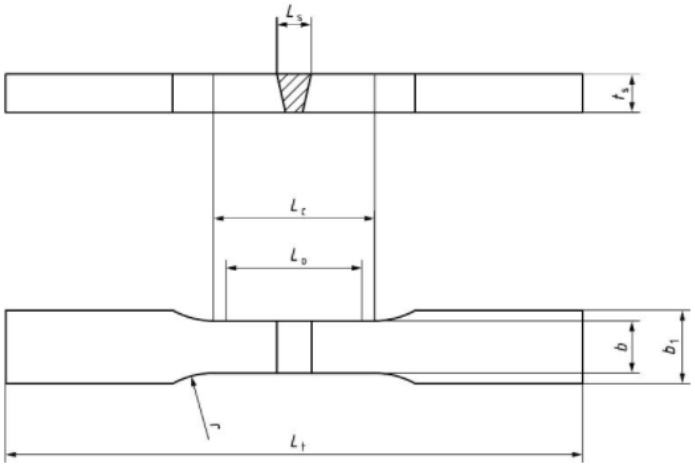
Табела 2.7. Испитување и тестирање на заварени проби [100]

Испитно парче	Тип на тест	Степен на испитување	Фуснота
Сочелен завар со целосна пенетрација	Визуелно	100%	-
	Радиографско или ултразвучно	100%	a
	Контрола на површина	100%	b
	Попречно испитување на затегање	2 примероци	-
	Попречно испитување на свиткување	4 примероци	c
	Испитување на жилавост	2 сета	d
	Испитување на тврдина	по барање	e
	Макроструктурно испитување	1 примерок	-
T- заварен спој и аголен завар со целосна пенетрација Аголен завар со целосна пенетрација на цевка со цевка и плоча со цевка	Визуелно	100%	-
	Контрола на површина	100%	b, f
	Радиографско или ултразвучно	100%	a, f, g
	Попречно испитување на свиткување	8 примероци	c
	Испитување на тврдина	по барање	e, f
	Макроструктурно испитување	2примерок	f
Аголни завари со делумна пенетрација	Визуелно	100%	f
	Контрола на површина	100%	b, f
	Испитување на тврдина	по барање	e, f
	Макроструктурно испитување	2примерок	f
a - ултразвучно испитување не треба да се користи за t<8 mm za и за материјали од група 8, 10, 41 и 48			
b - испитување со пенетранти или магнетни честички. За немагнетни материјали само пенетранти			
c - за испитување со свиткување, погледни точка 3.3			
d - еден сет од заварот и еден сет од ЗВТ. Се испитува за t> 12mm и само за основен материјал со утврдена вредност на жилавост. Температурата на испитување ја определува производителот во однос на намената.			
e - не се испитува ако основниот материјал е од под-група 1.1 и група 8, 41, 48			
f - тестот детално не дава информации за механичките својства, но ако податоците се потребни за примена тогаш треба да се испита			
g - за надворешен дијаметар ≤ 50 mm ултразвучно испитување не е потребно. За надворешен дијаметар >50mm, каде што технички не е можно да се изведе ултразвучно испитување, треба да се изведе радиографско испитување			



Слика 2.19. Локации за изработка на епрувети за мехнички испитувања на сочелен завар на плоча [103]

Основен принцип при проектирање на заварен спој е затегнувачката јакост на заварот да е еднаква или поголема од затегнувачката јакост на основниот материјал. За испитување на затегнување на заварената врска се користат стандрадни епрувети чија изработка е пропишана во стандардот ISO 4136 и истите може да бидат изработени со цилиндричен или призматичен попречен пресек, при тоа термичка обработка не е дозволено да се применува за нивна изработка [104]. Стандардот дозволува епруветите да се изработуваат од локации кои имаат одредени минимални несовршености кои се прифатливи при испитувања без разорување.



Слика 2.20. Епрувета за испитување на затегнување на сочелен завар кај плочи [104]

Епруветата за испитување на затегнување треба да биде изработена нормално на насоката на заварување со тоа што, после машинска обработка, оската на заварот треба да биде на средина од паралелната должина Lc на епруветата (слика 2.20) [104]. Додека димензиите на епруветата треба да бидат во согласност со димензиите дадени во табела 2.8 [104].

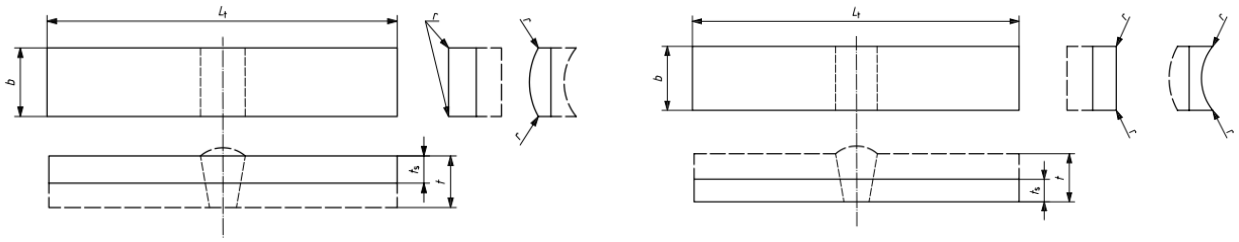
Табела 2.8 Дименизии на епрувети за испитување на затегнување на сочелен завар [104]

Термин (опис)		Симбол	Димензии
Тотална должина на испитното парче		Lt	да е прилагодено на машината за испитување
Ширина на краевите од епруветата		b1	b+12
Ширина на паралелната должина	плочи	b	12 за ts ≤ 2 25 за ts > 2
	цевки	b	6 за D ≤ 50 12 за 50 < D ≤ 168.3 25 D > 168.3
Паралелна должина		Lc	≥ Ls + 60
Радиус на премниот		r	≥ 25

Испитувањето на свиткување има за цел да ги испита деформационите способности на завареният спој и истото треба да се изврши согласно стандардот ISO 5173 на епрувети чија изработка зависи од дебелина на завареният спој. При испитување на завареният спој со дебелина < 12 (mm) се изработуваат четири епрувети, две за испитување на свиткување на лицето и две за коренот на заварот, додека за дебелина ≥ 12 (mm) се препорачуваат четири епрувети за попречно (странично) испитување на завареният спој [106].

Кај испитувањето на свиткување епруветата се поставува на две паралелни потпори (валци) и во средината се притиснува и се свиткува со помаш на ваљак (притискувач), во една насока со бризна од 1 (mm/s). Свиткувањето се одвива непрекинато се до појава на пукнатина од 2 (mm), а потоа се мери аголот на свиткување, доколку не се појават пукнатини, свиткувањето се одвива до паралелност на страните на епруветата, односно до агол на свиткување од 180°. Доколку не се наведени посебни барања испитувањето треба да се изврши на температура од 23±5 (°C) [105].

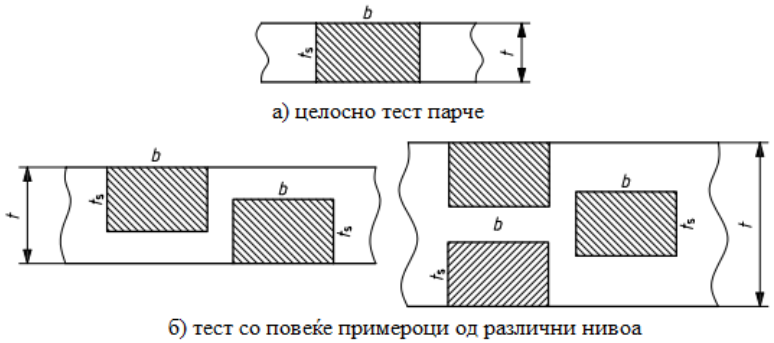
Обликот и димензиите на епруветите зависат од намената на испитното парче, односно дали е за испитување на свиткување на лицето и коренот на заварот или пак за странично испитување на свиткување на заварот.



а) од страна на лицето б) од страна на коренот на сочелен завар

Слика 2.21. Епрувета за испитување на свиткување [105]

Генерално, епруветата за испитување на свиткување од страна на лицето и коренот на заварот треба да биде со иста дебелина (ts) како и дебелината на основниот материјал блиску до заварената врска (t) (слика 2.22а). Доколку основниот материјал е со дебелина >10 (mm), испитното парче – епруветата треба машински да се обработи од една или две страни до дебелина 10±0.5 (mm), при тоа коренот или лицето на заварот да бидат во затегната зона. Во случај да треба да се испита во целост заварената врска со дебелина >10 (mm) се изработуваат повеќе епрувети од различни нивоа (слика 2.22б).



Слика 2.22. Локации за изработка на епрувети за испитување на свиткување од страна на лицето и коренот на заварот [105]

Ширината на епруветите (b) за испитување на свиткување од страна на лицето и коренот на заварот треба да биде 4ts или поголема, доколку поинаку не е специфицирано во релевантен применлив стандард [105].

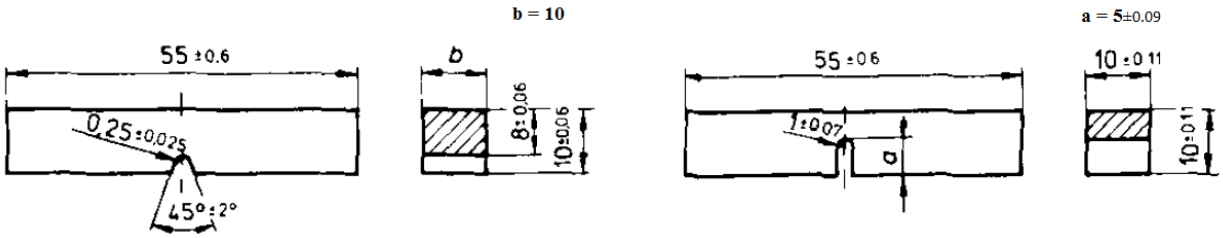
Должината на епруветите (Lt) треба да е еднаква на барањата односно од 250 (mm) до 450 (mm) за дебелина на парчиња до 30 (mm), од друга страна е поврзна со дијаметарот на внатрешниот цилиндер (d) – притиснувач и растојаните помеѓу валците [107].

Дијаметарот на внатрешниот цилиндер (d) – притиснувач треба да биде еднаков на 4ts за основен материјал со издолжување A ≥ 20 (%), во спротивно дијаметарот се пресметува со следниот израз [105]:

$$d = \frac{100\ x\ ts}{A} - ts \tag{2.7}$$

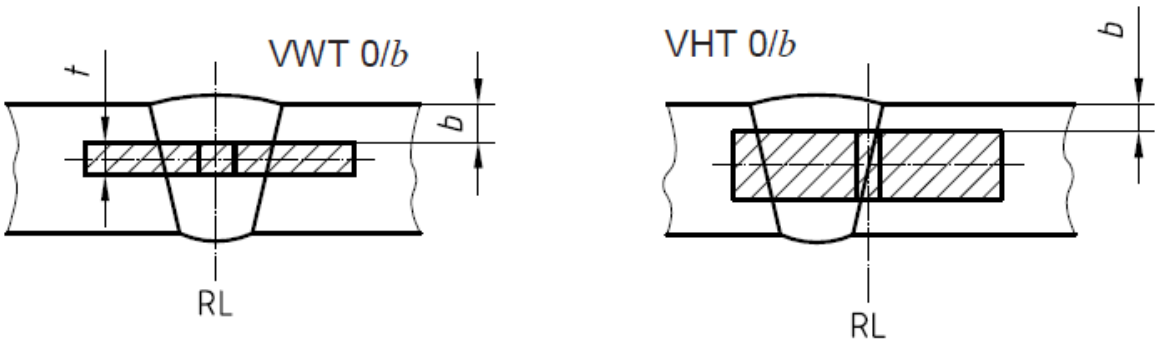
Бидејќи испитувањето се врши до појавата на првата пукнатина, односно до одреден агол α, надворешната површина на свитканиот дел (затегната зона) мора да биде добро видлива во текот на целата постапка на испитување, поради тоа што квалитетот на завареният спој се одредува според аголот на свиткување.

Испитувањето на жилавост на завареният спој се извршува по Шарпиев метод на епрувети со квадратен попречен пресек кои имаат „V“ или „U“ зарез и истите се изработуваат согласно стандардот ISO 9016 [108]. Локациите за изработка на епруветите и температурата на која се испитуваат треба да биде во согласно со стандардот ISO 15614-14, односно сет од три епрувети за испитување на жилавоста на јадрото на заварот со ознака VWT и сет од три епрувети за испитување на жилавост во зоната под влијание на топлина со ознака VHT.



Слика 2.23. Епрувети за испитување на жилавост со „V“ или „U“ зарез [108]

Епруветите за испитување на жилавост со „V“ зарез треба да бидат изработени на максимално растојание од 2 (mm) од лицето на основниот материјал и завареният спој [108].



Слика 2.24. Локации за изработка на епрувети за испитување на жилавост [108]

Температурата на епруветата во моментот на испитувањето треба да биде 23(ºC) ± 5(ºC), доколку поинаку не е специфицирано во барањето за испитување на жилавост. Ако испитувањето треба да се изведе на високи или ниски температури, епруветата треба да се постави во средина за загревање или ладење со која ќе се обезбеди бараната температура на епруветата, доколку се поставува во течна агрегатна средина треба временски да се задржи најмалку 10 (min), доколу е гасна средина минимално време на задржување е 30 (min). Епруветата треба да се испита во рок од 5 (s) од кога ќе се повлече од претходно споменатите агрегатни средини [108].

Вредноста на потрошената енергија за кршење на епруветата треба да биде идентична со основниот материјал. Притоа се зема просек вредност од сите три епрувети од локацијата на испитување, водејќи сметка да вредноста на потрошената енергија за секоја епрувета посебно не е помала од 70 (%) од просечната вредност [108].

Ознаката на епруветите за испитување на жилавост треба да ги содржи следните симболи:

1. Прв симбол:
   - U: Шарпи, U-зарез
   - V: Шарпи, V-зарез

2. Втор симбол:
   - W: изработка на епрувета чија референтна линија се поклопува со оската на заварената врска
   - H: изработка на епрувета чија референтна линија се поклопува со линијата на фузија
3. Трет симбол:
   - S: зарезот паралелен на лицето на изведената проба
   - T: зарезот нормален на заварената врска
4. Четврт симбол: (a) – растојание од центарот на зарезот до референтната линија
5. Пет симбол: (b) – растојание од лицето на заварената врска до поблиската страна на испитното парче

Епруветите за испитување на жилавост се изработуваат со машинска обработка од средишниот дел на заварената проба, зона 2 од слика 2.19., при тоа димензиите и толеранциите на изработка да бидат согласно стандардот EN ISO 9016 (табела 2.9) [108].

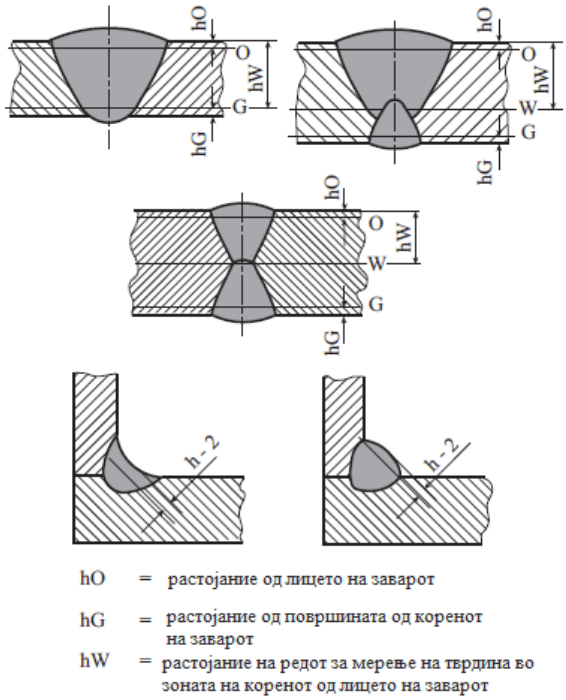
Табела 2.9 Дименизии и толеранции на епрувети за испитување на жилавост [108]

Термин (опис)	Епрувета со U - зарез		Епрувета со V - зарез	
	Номинални димензии	Машински толеранции	Номинални димензии	Машински толеранции
Должина	55 mm	±0,60 mm	55 mm	±0,60 mm
Висина	10 mm	±0,11 mm	10 mm	±0,60 mm
Ширина				
- стандардна епрувета	10 mm	±0,11 mm	10 mm	±0,11 mm
- епрувета со намалена дебелина	/	/	7,5 mm	±0,11 mm
- епрувета со намалена дебелина	/	/	5 mm	±0,06 mm
Висина под зарез	5 mm	±0,09 mm	8 mm	±0,06 mm
Радиус на зарез	1 mm	±0,07 mm	0.25 mm	±0,025 mm
Агол на зарез	/	/	45°	±2°
Растојание од оска на зарез и краевите на епруветата	27,5 mm	±0,42 mm	27,5 mm	±0,42 mm
Агол помеѓу рамнините на заварената проба и епруветата	90°	±2°	90°	±2°

Испитувањето на тврдина во принцип се изведува на истите епрувети кои се наменети за испитување на металографијата на завареният спој. Согласно стандард ISO 15614-14 завареният спој изведен со хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак не подлежи на испитување на тврдина и во принцип за да се утврди највисоко и најниско ниво на тврдина на основниот материјал и завареният спој, испитувањето на тврдина се прави согласно стандардот ISO 15614-1 односно стандардот ISO 9015-1 [109].

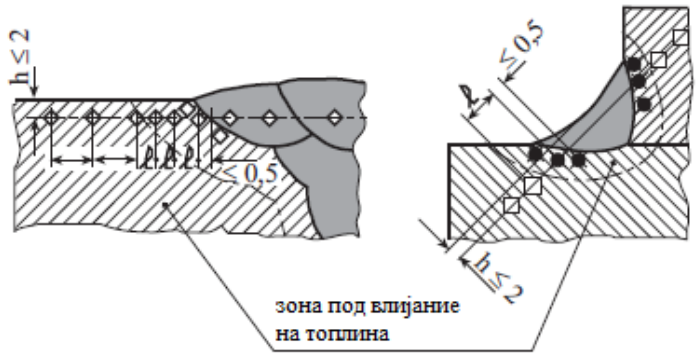
За испитување на тврдина на завареният спој согласно стандардот ISO 15614-1 се користи Викерсов метод со сила на втиснување 98 (N) (HV10). Во принцип за мерење на тврдина треба да се применува форма на испитување во редови, еден ред на испитување за аголни завари, и најмалку два реда на испитување за сочелни завари од кој еден во првиот коренов премин, а другиот во завршниот премин на завареният спој [107].

Бројот на редови во кои би се испитувала тврдината на завареният спој не зависи само од видот на заварот, туку и од дебелината на основниот материјал кој се заварува. За материјал со дебелина до 5 (mm) и помалку, во принцип се изведува само еден ред на испитување и тоа 2 (mm) под лицето на заварот. Кај основен материјал со дебелина поголема од 5 (mm) испитувањето на тврдина се врши во два реда и тоа на длабочина од 2 (mm) од лицето и коренот на заварот. Во случај да овие два реда не се доволни за соодветна проценка на тврдината на завареният спој, дополнителни редови на испитување треба да се изведат во зоната помеѓу првиот-коренов и завршниот премин. Распоредот на редовите за мерењата на тврдина треба да биде согласно слика 2.25 [99, 107].



Слика 2.25. Локации – зони за мерење на тврдина на завареният спој [107]

При испитувањето на тврдина треба да се запазат одредени насоки, односно кај секој ред треба да изврши мерење во три зони, зона на заварот, зона под влијание на топлина и зона на основниот материјал и во секоја зона треба да се најмлаку 3 индивидуални отпечатоци од мерење на тврдина. Во зоната под влијание на топлина, првото мерење треба да биде колку што е можно поблиску до линијата на фузија, растојанијата помеѓу секое индивидуално мерење – отпечаток се дадени во слика 2.26 [79, 99, 107].



Викерс ознака за тврдина	Растојание помеѓу индивидуалните мерења - отпечатоци L (mm)
HV5	0,7
HV10	1

Слика 2.26. Локации и растојание за индивидуално мерење на тврдина во ЗВТ [107]

3. Предмет, цели и методологија на истражување

3.1. Идентификација на проблем

Во точка 2.1. е напоменато дека хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак ги комбинира предностите на двата индивидуални процеси на заварување, LBW и GMAW резултирајќи во процес на заварување кој се карактеризира со големи брзини на заварување, ниско ниво на внесување на топлина по единица должина на заварот, притоа постигнувајќи поголема длабочина на пенетрација во основниот материјал, и зголемени димензионални толеранции во изработка на жлебовите за заварување. Со користење на овие предности хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак претставува одлична можност за заварување на дебели елементи >10 (mm) во еден премин, притоа доведувајќи до значително намалување на оперативните трошоци и термичкото оптоварување во споредба со GMAW процесот на заварување.

Од друга страна е релативно нов процес на заварување и неговата примена во индустријата е минимално застапена, дел поради комплексноста на комбинирање на два извори на топлина и зголемениот број на параметри за заварување, а дел поради тоа што не е доволно истражен самиот процес особено за заварување на дебелини >10 (mm). Согласно истражувачот Bunaziv [20] HLAW овозможува заварување на големи дебелини со еден премин, но во одредени случаи се јавуваат сериозни несовршености во заварот и висока тврдина поради погонската енергија на изворите и големите брзини на заварување, резултирајќи во брзо одведување на топлина од зоната на заварување, зголемена брзина на ладење. Главните несовршености кои се појавуваат при изведба на сочелен завар во еден премин во зависност од параметрите на хибридното заварување со ласерски сноп и електирчен лак е појава на прокапини од кореновата страна на заварот или пак недоволна пенетрација во коренот поради несоодветен избор и сооднос на параметрите, како и поради неповолна динамика на растопената маса во заварувачкото купатило.

Иако хибридното ласерско електролачно заварување претставува ефективен процес на заварување за поголеми дебелини од конструктивен челик, сепак треба да се утврди како одредени параметри би влијале врз карактеристиките на заварот изведен во еден премин. Врз основа на претходни истражувања, може да се констатира дека моќноста на ласерскиот сноп и брзината на заварување се особено значајни за карактеристиките на заварот, од друга страна брзината на заварување е директно поврзана со количеството на внесена топлина по единица должина на заварот од што зависи и длабочината на проварување и севкупниот квалитет на заварот. Дополнителен параметар од кој зависи квалитетот на заварот и неговите механички карактеристики е вториот извор на топлина односно вредностите на јачината на струјата на заварување и нејзинот сооднос со моќноста на ласерскиот сноп.

Иако до сега се направени неколку истражувања поврзани со хибридно ласерско електролачно заварување во еден премин на поголеми дебелини > 10 (mm) на конструктивен челик, сè уште постојат непознати фактори за влијанието на параметрите врз карактеристиките на хибриден завар изведен во еден премин на конструктивен челик со поголема дебелина.

3.2. Предмет и цели на истражување

Предмет на истражување во оваа докторска дисертација е изведба на експеримент на сочелно хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак во еден премин на елементи изработени од конструктивен челик во квалитет S355J2 со дебелина од 12(mm). Изведените хибридни завари подлежат на механички испитувања со цел да се анализира и определи какво е влијанието на параметрите на HLAW врз механичките карактеристики на заварот. Дополнително, се применува визуелна и димензионална контрола за анализа и оцена на геометријата на хибридните завари и нивното ниво на квалитет во согласност со стандард ISO 12932 [110].

За истражување на влијанијата на параметрите на заварување врз карактеристиките на заварот се применува повеќефакторен експеримент, во кој како независни променливи големини се определени: моќноста на ласерскиот сноп, јачината на струјата на заварување и брзината на заварување.

Главни цели на истражувањето:

- Добивање на продлабочени знаења во областа на HLAW при сочелно заварување во еден премин на конструктивен челик;
- Испитување и анализа на ефикасноста и ефективноста на HLAW во еден премин на конструктивен челик;
- Определба на влијанието на изворите на топлина (ласерскиот сноп и електричниот лак) и нивна оптимизација при HLAW на конструктивен челик за да се постигне подобар квалитет на хибридниот завар, зголемена пенетрација и продуктивност;
- Определба на влијанието на количеството на внесена топлина врз микроструктурата на заварот и зоната под влијание на топлина при HLAW во еден премин на конструктивен челик;
- Определба на влијанието на моќноста на двата извори на топлина и брзината на заварување врз механичките карактеристики на хибридниот завар;
- Определба на големините на параметрите на заварување за добивање на хибридни завари без дефекти при HLAW во еден премин на конструктивен челик;
- Добивање на резултати за поедноставна примена на HLAW во индустријата и негово понатамошно истражување;
- Техно-економска анализа за индустриска имплементација и примена на HLAW на конструктивен челик, со фокус на автоматизирано производство и заварување на поголеми дебелни >10(mm) во еден премин, и,
- Развивање на математички модел за да се определи влијанието на параметрите на HLAW при сочелно заварување во еден премин на конструктивен челик.

3.3. Хипотези

Како и секое друго истражување, така и оваа докторска дисертација се заснова на одредени хипотези кои се базираат на теоретско истражување кое е презентирано во точка 2, како и од одредено практично искуство:

- Хипотеза 1: HLAW е ефикасен процес за заварување на конструктивен челик во еден премин за дебелини во опсег од 10 до 15(mm) при правилно подесување на големиот број на параметри за заварување;
- Хипотеза 2: Механичките карактеристики и микроструктурата на хибридниот завар зависат од количеството на внесена топлина по единица должина од двата извори на топлина. Зголемено количество на внесена топлина по единица должина доведува до намалување на затегнувачката јакост на заварот поради појава на поголеми кристални зрна и промена на микроструктурата;
- Хипотеза 3: Геометријата на попречниот пресек на хибридниот завар зависи од сообносот на двата извори на топлина, и од динамиката на растопената маса која е директно поврзана со јачината на струјата на заварување. Зголемена моќност на ласерскиот сноп доведува до зголемена длабочина на пенетрација и насочен заварен спој, односно е правопропорционален;
- Хипотеза 4: Соодветен избор на параметрите за HLAW на конструктивен челик доведува до помали оперативни трошоци, зголемена продуктивност и зголемена ефикасност во потрошувачката на енергија;
- Хипотеза 5: Моќноста на ласерскиот сноп, јачината на струјата на заварување и брзината на заварување се основни параметри кај HLAW на конструктивен челик, кои меѓусебно треба да бидат соодветно подесени за да се добие хибриден завар со прифатлив квалитет и механички карактеристики согласно техничките стандарди.

3.4. Методологија на истражување

Со цел да се исполнат поставените цели на истражувањето, се користи експериментален метод како еден од основните методи на кавантитативно истражување. Согласно Qi и Chen [72] овој тип на истражувачки метод користи научен метод за да воспостави причинско-последична врска помеѓу група на променливи, односно една или повеќе независни промениливи се променуваат и аплицираат на една или повеќе зависни промениливи со цел да се согледаат ефектитите од промената и истите да бидат измерени [111].

Првенствено пред да се пристапи кон експериментално истражување, извршена е анализа на моменталната состојба на познавања од областа на хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак на конструктивен челик, и врз основа на истата определени се параметри за извршување на прелиминарното истражување, а потоа и конечно дефинирање на параметрите за извршување на главното експериментално истражување, односно методологијата на истражување е составена од три дела.

3.4.1. Теоретски истражувања

Врз основа на преглед и анализа на моментално достапна научна и стручна литература за HLAW на конструктивен челик и влијанието на поединечни параметри на заварувањето врз квалитетот на заварот, утврдено е дека со хибридното ласерско електролачно заварување во еден премин може успешно да се заваруваат конструктивни челици со дебелини до 10 (mm). Додека за поголеми дебелини > 10 (mm), сè уште постојат непознати фактори за влијанието на параметрите врз карактеристиките на хибридниот завар изведен во еден премин, односно се појавуваат голем број на несовршености во заварот. Генерално несовршеностите кои се појавуваат се прокапини од кореновата страна на заварот или пак недоволна пенетрација во коренот поради несоодветен избор и сооднос на параметрите.

Сепак, преку систематско проучување и споредба на повеќе теории, модели и научни истражувања во точка 2 од оваа докторска дисертација, создадена е солидна база врз основа на која се определени параметрите на хибридно заварување за прелиминарното истражување.

3.4.2. Прелиминарно истражување

Прелиминарното истражување е извршено со цел да се добие хибриден завар кој не поседува визуелни дефекти и претставува појдовна точка за утврдување на вредностите на независно променливите големини и експерименталниот простор преку кој се истражуваат влијанијата од големините на параметрите на HLAW врз карактеристиките на заварот изведен во еден премин на конструктивен челик.

Прелиминарното хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак во еден премин е изведено на елементи за заварување изработени од конструктивен челик S355J2 со дебелина од 12(mm), а визуелното испитување е извршено согласно стандард ISO 12932.

Вредностите на независно променливите големини во прелимнарното истражување се утврдни врз база на теоретското истражување и истите се менуваат во следните интервали:

- моќноста на ласерскиот сноп, P_L(kW): 10 – 13 (kW);
- брзина на заварување, Vz (m/min): 1.4 – 2.2 (m/min);
- јачината на струјата на заварување Iz (A): 260 – 330 (A)

Дополнителено, покрај вредностите на независно променливите големини, се менуваат и вредностите на зависно променливите со цел да се утврди експериментален простор кој обезбедува визуелно квалитетени завари и претставува појдовна основа за експерименталното истражување.

3.4.3. Експериментално истражување

Појдовна основа за експериментален метод на истражување претставува дизајнот на експеримент кој треба да обезбеди веродостојност на резултатите при најмал број

експериментални единици. Резултатите од проектирањето на експериментот се искажуваат во најголема мера преку дизјанот на експеримент – неговиот облик, структура и други елементи.

За докажување на хипотезите во оваа докторска дисертација, експриментот се изведува во лабораториски услови каде што има инсталирано целосна опрема за HLAW и опрема за механичко испитување.

Експерименталното истражување се состои од четири дела.

Во привот дел се врши дизајн на експеримент и определба на независни променливи големини со нивните максимални и минимални вредности во експерименталниот простор. Вредностите на независно променливите параметри се определни преку прелиминарното испитување и нивните интервали на промена се следни:

- моќноста на ласерскиот сноп, PL(kW): 11.5 – 13 (kW);
- брзина на заварување, Vz (m/min): 1.8 – 2.2 (m/min);
- јачината на струјата на заварување Iz (A): 303 – 329 (A)

Покрај вредностите на независно променливите параметри кои се променуваат во текот на истражувањето, утврдени се и вредностите на параметрите кои се константни за време на целото истражување:

- основен материјал, конструктивен челик S355J2 со дебелина од 12 (mm);
- димензии на елементи кои сочелно се заваруваат пред заварување 150 x 400 (mm);
- број на премини: 1;
- вид на ласер: *fiber ласер*;
- позиција на фокус на ласерски сноп: -3mm;
- агол на поставеност на ласерска глава во однос на вертикална оска: 0^o;
- додатен материјал – полна жица со дијаметар 1.2 (mm) во квалитет G 42 3 M21 3Si1 согласно стандард EN ISO 14341;
- агол на поставеност на електрода во однос на основен материјал: 65^o;
- состав на заштитен гас: 82% Ar и 18% CO2, M2-1 согласно станадрад EN ISO 14175;
- проток на заштитен гас: 25 (l/min);
- редослед помеѓу ласерски сноп и електричен лак: *електиричен лак напред*;
- растојание помеѓу извори на топлина: 3 (mm);
- должина на слободен крај на електродна жица: 15 (mm).

Во вториот дел се изведува сочелно хибридно ласерско електролачно заварување во еден премин на елементи од конструктивен челик S355J2 со дебелина од 12 (mm). За независни променливи големини се усвојуваат: моќноста на ласерскиот сноп, јачината на струјата на заварување и брзината на заварување.

За реализација на експерименталното истражување се изработуваат 15 заварени проби, 8+1 за ортогоналниот метод и 6 за Taguchi метод. Заварените проби се изведени во согласност со пропишаните норми и стандарди за постапката на заварување како и видот на материјалот кој се заварува, во конкретниот случај констурктивен челик S355J2 со дебелина од 12 (mm).

Во третиот дел се врши испитувањето на заварените проби и изведените хибридни завари за утврдување на механичките карактеристики, испитување без разорување и механички испитувања со разорување, односно:

- Визуелна контрола.
- Радиографска контрола.
- Испитување на затегнување.
- Испитување на свиткување;
- Испитување на жилавост;
- Металографско испитување на заварот и ЗВТ;
- Испитување на тврдината на заварот и ЗВТ, и
- Мерење на димензиите на заварот.

Постапките на испитување на заварените проби изведени со хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак – HLAW за определување на механичките карактеристики се изведуваат во согласност со стандард EN ISO 15614-14 [100].

Во последниот дел се врши анализа и обработка на добиените резултати, преку два методи: *ортогонален метод* и *Taguchi метод*. Преку овие два методи се дефинира математички модел преку кој се определува влијанието на независно променливите големини. Моделот кој се користи за *ортогоналниот метод* е 2^3, односно три независно променливи големини на две нивоа максимално и минимално ниво [112]. Адекватноста на моделот се потврдува врз основа на резултатите од експериментот преку Fisher-ови критериуми за веројатност од 95 (%) и степен на слобода $N(n-1) = 2^3 (3-1) = 16$. Додека за анализа на меѓусебното дејство на поединечни параметри кај трифакторниот експеримент се користи регресивен модел во следниот облик:

$$Y = b0 + b1X1 + b2X2 + b3X3 + b12X1X2 + b13X1X3 + b23X2X3 + b123X1X2X3 \quad (3.1)$$

По извршената проверка на коефициентот на регресија и адекватноста на моделот, преку Student–овиот критериум се определува значењето на коефициентите на регресивниот модел.

Паралелно, анализа и обработка на добиените резултати за влијанијето на независните променливи големини врз механичките карактеристики на заварот се врши со употреба на ортогонални низи по *метод на Taguchi* [113, 114], односно одбраниот модел е 3^3 и изработени се 9 комбинации од кои 3 се поклопуваат со ортогоналниот метод. На крај, добиените резултати се анализираат преку S/N соодносот.

4. Експериментално истражување

4.1. Технички податоци за материјалите и опремата за заварување

4.1.1. Технички податоци за основниот материјал

Основниот материјал кој се користи во ова истражување е S355J2 +N и истиот припаѓа во групата на конструктивни челици односно според техничкиот извештај ISO/TR 15608 е дел од Група 1.2 – челици со минимален напон на течење 275 (N/mm^2) ≤ ReH ≤ 360 (N/mm^2).

Лимот од кој се изработени 52 парачиња е со сериски број 488900 и димензии 12x2450x4500 (mm), произведен во согласност со стандарите EN 10025-2 и EN 10029 со толеранција на номинална дебелина Класа А и толеранции на рамност Класа N. По процесот на валање од страна на надворешно инспекциско тело извршена е контрола на квалитет и изготвена е атесна документација за механичките и хемиските својстава на лимот. Инспекцискиот сертификат за овој вид на лим е со број 000562 (во прилог на оваа докторка дисертација), а неговите механички и хемиски карактеристики се следните:

Табела 4.1 Хемиски состав на основниот материјал S355J2

Основен материјал	Хемиски елемент														
	C %	**Si %**	**Mn %**	**P %**	**S%**	**Al %**	**N%**	**Cr%**	**Cu %**	**Ni %**	**Ti %**	**V %**	**Nb %**	**Mo %**	**CEV %**
S355J2+N	0.16	0.24	1.05	0.014	0.007	0.045	0.007	0.11	0.33	0.09	0.001	0.01	0.001	0.001	0.39

Табела 4.2. Механички карактеристики на основниот материјал S355J2

Основен материјал	Испитување на затегнување		Испитување на жилавост					Издолжување
	ReH (N/mm^2)	Rm (N/mm^2)	Сигнација на парче (J)			Средна вредност	At. (C)	A (%)
			1	2	3			
S355J2+N	400	525	128	115	118	120	-20	29.6

4.1.2. Технички податоци за додатниот материјал

Додатниот материјал кој се користи при хибридното заварување на стандардните елементи (плочи) директно влијае врз карактеристики на хибридниот завар. Во конкретниот случај е користена полна жица G3Si1 со стандардна ознака според EN ISO 14341-A: G 42 3 M21 3Si1 и дијаметар од Ø1.2 (mm). Оваа жица претставува, бакарно обложена жица легирана со Si и Mn, наменета за заварување на нелегирани челици, и генерално се користи за конструкции, садови под притисок и изградба на бродови. Овој вид на жица обезбедува одличен квалитет на завареният спој при големи брзини на доведување на жицата и при висока јачина на струјата на заварување, а поради тоа е прв избор при хибридно заварување на конструктивен челик. При заварување со G3Si1 како заштитен гас може да се користи гасна мешавина на Ar/CO_2, чист Ar или чист CO_2. Препорачливо е заварувањето да се изведува со еднонасочна струја со индиректен поларите (+) на жицата.

Табела 4.3. Параметри на заварување при користење на G3Si1 со дијаметар од Ø1.2 (mm)

Дијаметар (mm)	Брзина на доведување на жица (m/min)	Јачината на струјата на заварување (A)	Напон на електричниот лак (V)
∅ 1,2	2,5-15	120-380	18-34

Табела 4.4. Хемиски состав на додатниот материјал G3Si1

Додатен материјал	Хемиски елемент											
	C %	**Si** %	**Mn** %	**P** %	**S**%	**Al** %	**Cr**%	**Cu** %	**Ni** %	**V** %	**Mo** %	**Zr+Ti max** %
G3Si1	0.06	0.88	1.50	0.009	0.006	0.002	0.027	0.076	0.037	0.002	0.01	0.1

Табела 4.5. Механички карактеристики на додатниот материјал G3Si1

Додатен материјал	Испитување на затегнување		Издолжување	Испитување на жилавост		Заштитен гас
	ReH (N/mm^2)	Rm (N/mm^2)	A (%)	At. (C)	Средна вредност	
G3Si1	380	560	20	-20	47	CO_2
	420	580	20	-30	47	80Ar/20CO_2

4.1.3. Технички податоци за заштитниот гас

Заштиниот гас кој се користи при изведување на експерименталното истражувње е со комерцијален назив Corgon 18 или гасна мешавина на база инертен гас и според стандардот EN ISO 14175 има ознака M21 ArC 18, односно е мешавина на 82 (%) Ar и 18 (%) C.

Corgon 18 е двокомпонентна смеса, која како резултат на добрите карактеристики што ги поседува е најшироко применувана гасна смеса за заварување со MIG постапка. Најчесто се користи за заварување на нелегирани и нисколегирани челици. Големата содржина на CO_2 овозможува длабоко проварување и како резултат на тоа слободно може да се користи при заварување на поголеми дебелини на основниот материјал. Аргонот од друга страна овозможува подобар пренос на додатниот метал, стабилен електричен лак и минимално распрскување. На слика 4.1 е прикажано шишето во кој е компримиран заштитниот гас и истото се наоѓа од надворешната страна на лабораторијата каде што е изведено хибридното заварување, и преку цевен систем и вентил за регулација се доведува и подесува притисокот и протокот на заштитниот гас во зоната на заварување.

Слика 4.1. Шише за заштитен гас и цевен систем со вентили за регулација

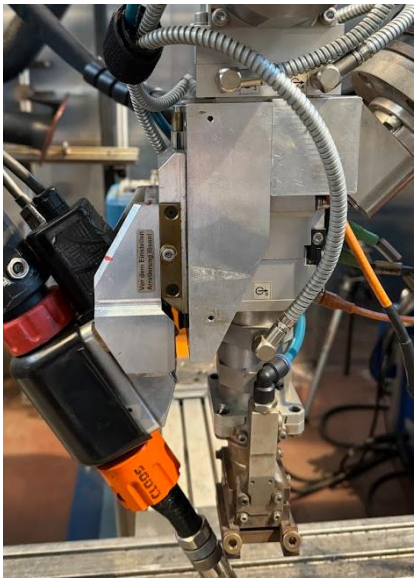
4.1.4. Технички податоци за опремата за заварување

За изведувањето на хибридното заварување на конструктивниот челик користена е опрема која е инсталирана во лабораторијата на Федералниот институт за истражување и тестирање на материјали (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung – BAM), Берлин, Германија:

- IPG 20-kW Yb fiber laser YLR 20000.
- CLOOS Qineo Pulse 600A.
- CLOOS Romat 400/30

IPG 20-kW Yb fiber laser YLR 20000, BIMO HP head. Овој fiber ласер претставува моќен ласерски извор со максимална моќност од 20.000 (W) дизајниран за различни идустриски примени како што се сечење, заварување и адитивно производство. Неговите основни технички карактеристики и параметри кои се користат при изведување на експериментот се следните:

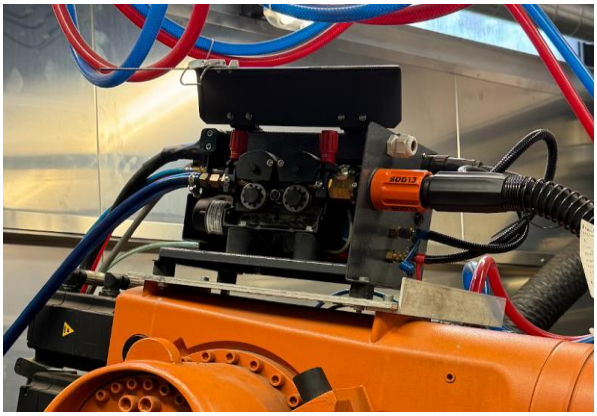
- Максимална излезна моќност: 20 (kW).
- Моќност за изведба на заварените проби: 8-13 (kW).
- Бранова должина на емитирана светлина: 1070 (nm).
- Коефициент на корисно полезно дејство: 30-35 (%).
- Квалитет на ласерскиот сноп: 11,2 (mm x mrad).
- Дијаметар на јадрото на оптичкото влакно: 200 (mm).
- Должина на фокусот емитувана од ласерската глава: 350 (mm).
- Дијаметар на фокусот на ласерскиот сноп: 0,56 (mm).
- Систем за ладење: водено ладење.



Слика 4.2. Fiber ласер IPG 20-kW Yb со ласерска глава BIMO HP

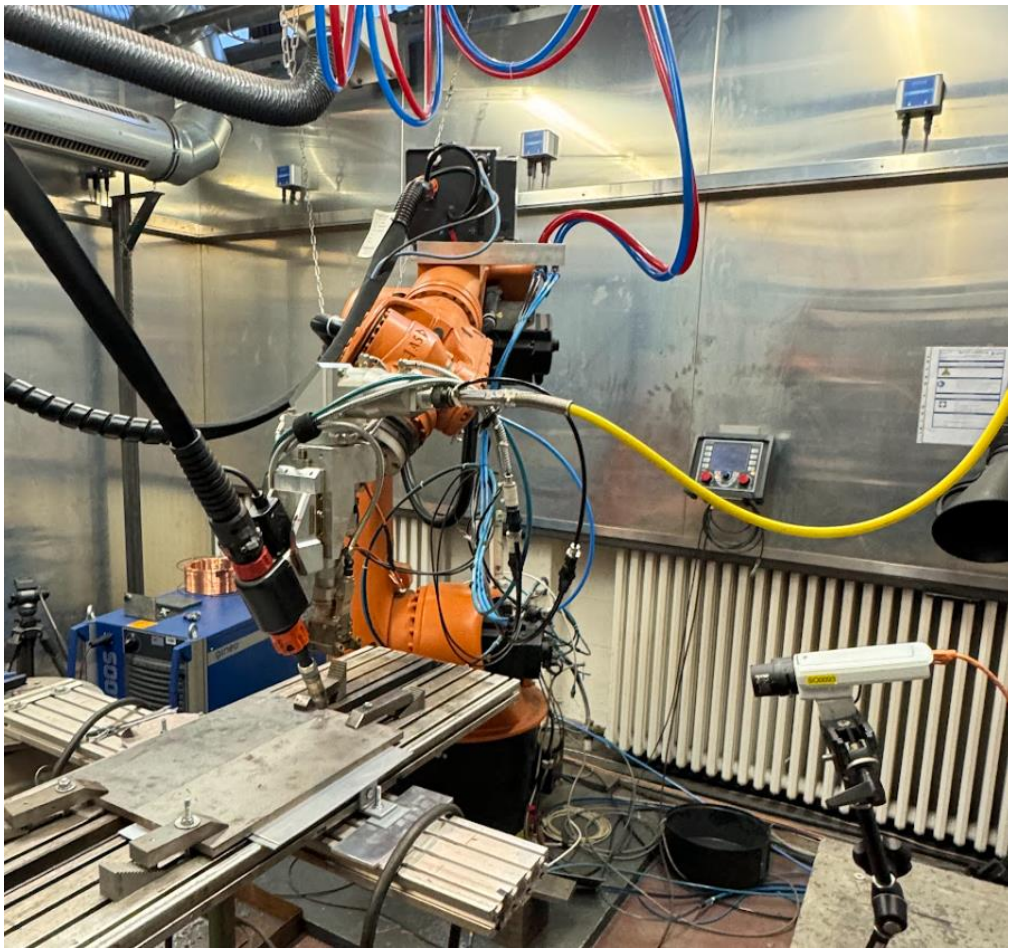
CLOOS Qineo Pulse 600A, Premium, QineoWire drive automation. Овој апарат за MIG/MAG заварување овозможува 5 различни подпроцеси за заварување и е наменет за широк спектар на апликација. Истиот е опремен со синергиски режим на работа и две дополнителни фини прилагодувања, должина на лакот (arc length) и карактеристика на лакот (arc dynamic). Преку синергискиот режим на работа, динамичката крива – карактеристиката на изворот на струјата за заварување може совршено да се прилагоди на надвовршените фактори. Уредот за заварување е опремен со надворешен уред – механизам за автоматизирано доведување на жица кој може да биде монтиран и на индустрискиот робот, а се контролира преку оперативен модел Premium. Со избор на брзината на доведување на жицата со интерна програма користејќи внатрешни карактеристични криви се подесуваат влезните параметри на јачината на струјата за заварување и напонот на лакот. Негови основни технички карактеристики и параметри кои се користени при изведување на хибридното заварување се:

- Јачина на струја на заварување: 40-600 (A).
- Јачина на струја при заварување: 260-330 (A).
- Напон на електричниот лак при изведба: 30-34 (V).
- Максимална брзина на доведување на жица: 30 (m/min).
- Брзина на доведување на жица при изведба: 8-14 (m/min).



Слика 4.3а. Апарат за заварување Qineo Pulse 600A со уред за доведување на жица QineoWire drive automation

CLOOS Romat 400/30. Овој модел е индустриски робот со напојување од 400 (V) со 6 оски, дизајниран за MIG, TIG и ласерско заварување со опсега на работа од 2 (m), односно дијаметар на работа од 4,06 (m). Ротациите за оска бр.1 е во опсег $\pm$ 185^{o} и континуирано за крајната оска бр.6 $\pm$ 350^{o} и во согласност на тоа брзината на ротација за првата оска е 140 (^{o}/s), а за оска бр.6 322 (^{o}/s). Опсегот на повторливост за позиција е $\pm$ 0,15 (mm) со носивост од 30 (kg).



Слика 4.3b. Индустриски робот со ласерска глава и горилник за MIG заварување и работна маса со елементите за заварување

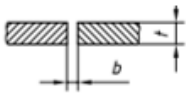
4.2. Подготовка на елементите за заварување

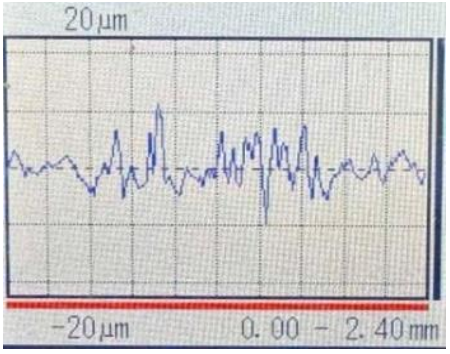
Подготовка на елементите за заварување е извршена согласно пропишаните европски стандарди (EN ISO 9692-1). Првенствено, лимот со димензии 12x2450x4500 (mm) е автоматизирано пескарен со челични зрнца SA2.5 за целосно отстранување на површинските масти, нечистотии и површински корозии.

Стандардот за специфицирање и квалификација на процедурата за хибридно заварување EN ISO 15614-14 не дозволува елементите кои се заваруваат термички да бидат оптоварувани пред процесот на заварување, а истите треба да имаат минимална должина од 350 (mm) за изработка на сите потребни епрувети за механички испитувања. Поради овие барања, вкупно 30 парчиња се исечени на димезнии 160x410 (mm) со користење на CNC плазма со јачина на плазмениот лак 100 (A) и брзина на сечење од 1.000 (mm/min). Машински се обработени со глодање со цел порамнување по целиот периметар и изработка на подготовка за заварување, како и отстранување на ЗВТ која е појавена како резултат на сечењето со плазма. Конечната димензија на елементите за заварување е 150x400 (mm).

Согласно стандард EN ISO 9692-1 усвоена е подготовка за заварување со симбол „II“ за обичен конструктивен челик со дебелина ≤ 15 (mm) и максимална широчина на грло до 1 (mm), односно за широчина на грло е усвоено 0 (mm). Со цел да се исполни условот, а при тоа да се потврди подготовката на рабовите за заварување измерена е рапавоста, прикажано на слика 4.4. Просечни измерени вредности на рапавоста се: Ra 1,84 (μm), Rp 4,66 (μm) и Rz 8,68 (μm). Согласно измерените просечни вредности, условот за широчина на грлото да не надиме 1 (mm) е задоволен.

Табела 4.6. Подготовка на рабовите за заварување во согласно со EN ISO 9692-1

Материјал	Дебелина t (mm)	Симбол ISO 2553	Скица	Димензии			Постапки на заварување во согласнот ISO 4063	Илустрација на заварот
				Агол α	Широчина на грло b (mm)	Висина на грло c (mm)		
S355J2+N	≤ 15	II		/	1 ≤ b	/	522	



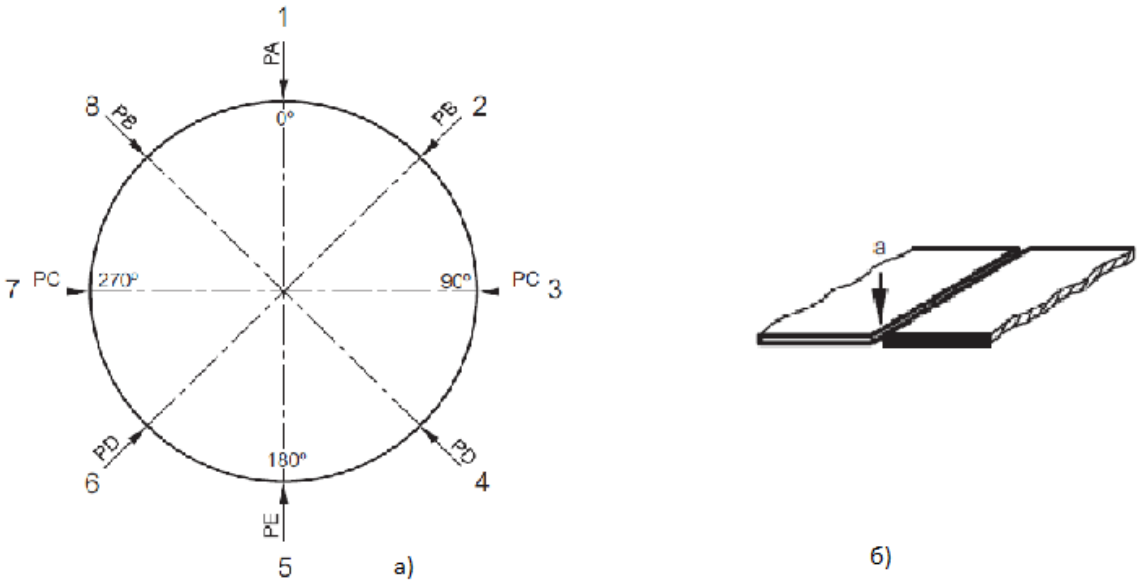
Слика 4.4. Мерење на просечна рапавост на површините на рабовите за заварување

По извршената подготовка на елементите, секој од нив е изолиран со фолија и спакуван во картонска кутија со цел да не дојде до појава на површинска корозија за време на транспортот на парчињата до лабораторијата на заварување, прикажано на слика 4.5.

Слика 4.5. Пример на изолација и пакување на елементите за заварување при транспорт

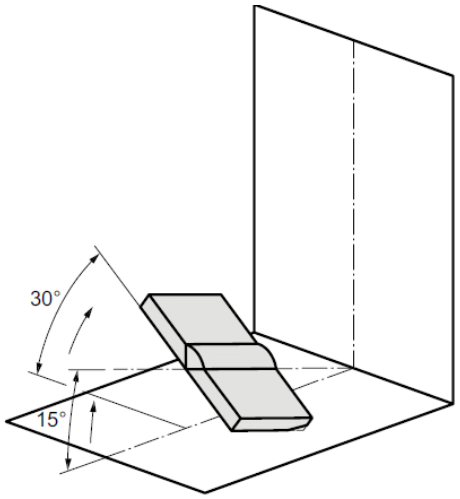
4.3. Изведба на хибридното заварување

Хибридното заварувањето е изведено во лабораториите на Федералниот институт за истражување и тестирање на материјали – BAM во соработка со германскиот истражувачки институт Fraunhofer IPK (Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology IPK). Управувањето со опремата за заварување е изведено од страна на нивно сертифицирано лице согласно стандард ISO 14732. Работната температурата во лабораторијата за време на заварувањето е 18-20 (°C). Вкупно се изведени 32 хибридни завари, од кои 15 директно се користат за експериментално истражување. Сите хибридни завари се изведени во хоризонтална положба PA согласно стандард EN 6947. Оваа просторна положба е едноставна и идеална во споредба со останатите, поради тоа што растопениот метал како резултат на гравитацијата одлично се разлева и го потполнува жлебот. Дел од останатите положби се потешки за изведба и поради тоа се нарекуваат принудни положби на заварување, а поради тоа што цел на истражувањето е определување на влијанието на параметрите на хибридното заварување врз карактеристиките на заварот усвоена е хоризонтална положба на заварување.



Слика 4.6. Положби на заварување според стандард EN ISO 6947 [118]

Под хоризонтална положба PA на заварување се подразбира елементите да се паралелни во однос на хоризонталната рамнина, но сепак постојат одредени толеранции кои укажуваат колкави треба да бидат максималните ротациони и линиски отстапувања., дадени на слика 4.7.



Позиција на заварување	Ознака	Наклон **S**	Ротационо **R**
Хоризонтална положба	PA	± 15º	± 30º

Слика 4.7. Толеранции на ротациони и линиски отстапувања за положба PA [118]

4.3.1. Процедура и параметри за хибридното заварување на заварените проби

Претходно беше напоменато дека од вкупните 32 завари, 15 хибридни завари се изведени за реализација на експерименталното истражување, а останатите се дел од прелиминарното истражување со цел да се добие хибриден завар кој не поседува визуелни дефекти и претставува појдовна точка за утврдување на вредностите на независно променливите големини и експерименталниот простор.

Непосредно пред да се започне со заварувањето, рабовите на сите елементи се исчистени со ацетон за да се отстрани маснотијата и прашината од површината и потоа на работната маса се поставуваат паралелно без меѓусебно растојание-зјај. По извршеното позиционирање елементите се прицврстени со стеги за прицврстување. На почетокот и крајот од елементите се изведуваа точкести завари со помош на ласерскиот сноп за да се обезбеди 0 (mm) растојание-зјај. Моќноста на ласерскиот сноп за изведување на точкестите завари е 5 (kW) со брзина на заварување од 0,6 (m/min). Почетни и крајни плочи не се користат, поради тоа што 25 (mm) од двете страни на заварената проба се сечат и отфрлат, односно не подлежат на испитување (слика 4.8).

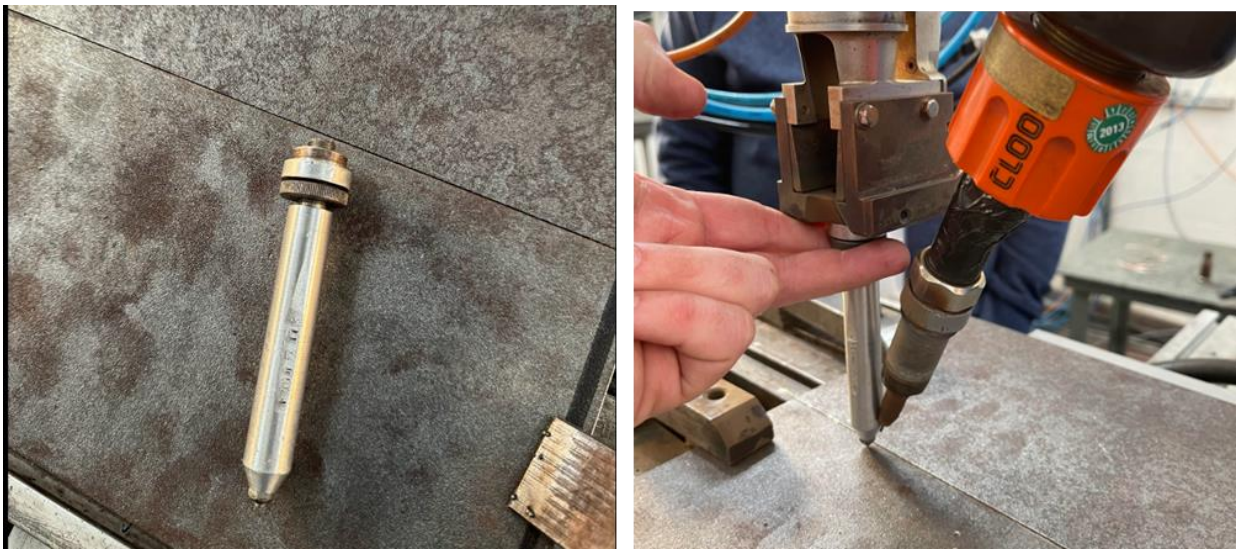
Слика 4.8. Позиционирање и прицврстување на елементите за заварување

Следен чекор е подесување на траекторијата на заварување, односно позиционирање и мерење на 3 позиции по нејзината должина (почетна, средна и крајна позиција) и автоматско определување на средните вредности на траекторијата на заварување. Експерименталното истражување е изведено така што како водечки извор на топлина е позициониран електричниот лак, а ласерскиот сноп е вториот извор кој го следи електричниот лак или уште познат „arc leading technique“. Двата извори се прицврстени на роботски манипулатор која се контролира преку далечински управувач, а растојанието помеѓу изворите на топлина е фиксирано на 3 (mm), односно ова растојание е помеѓу врвот на слободниот крај на електродната жица и точката на ласерскиот сноп на површината од елементите кои се заваруваат, прикажано на слика 4.9. Поради тоа што, растојанието е релативно мало и истото е потребно да биде запазено, на чаурата за довод на заштитен гас од страна ласерскиот сноп е изработен жлеб за да не се попречува неговото продирање во елементите кои се заваруваат (слика 4.9).

При изведување на прелиминарното истражување, кај одредени проби на заварување растојанието помеѓу двата извори на топлина е подесено на 5 (mm).

Слика 4.9. Растојание помеѓу изворите на топлина и жлеб на чаурата за довод на заштитен гас

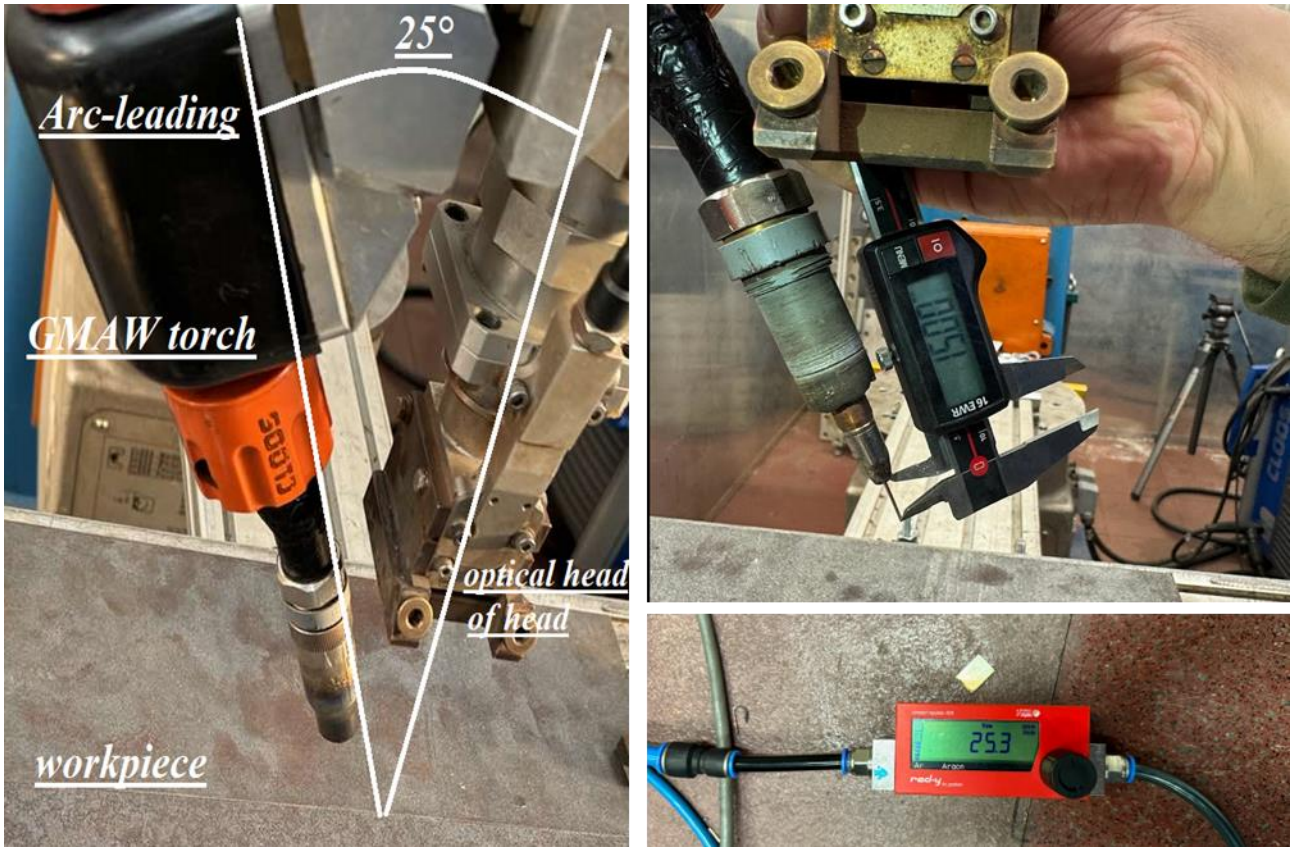
За време на процесот на заварување фокусот на ласерскиот сноп кај сите елементи на заварување е позициониран под површината на елементите, односно на растојание од -3 (mm) во насока на дебелината на материјалот. Ова растојание на фокусот е избран поради зголемениот волумен на заварувачкото купатило и дополнителната конвексност од растопувањето на додатниот материјал. Влијанието на фокусот на ласерескиот сноп е објаснето во поглавие 2.1.3. од докторската дисертација. За точно позиционирање на фокусот на ласерскиот сноп е користен мерен инструмент – калибратор кој се поставува на врвот од ласерската глава и со негов допир до површината на елементите се калибрира и меморира позицијата на ласерската глава, прикажано на слика 4.10.



Слика 4.10. Калибратор и калибрирање на фокусот на ласерскиот сноп -3 (mm) под површината на елементите кои се заваруваат

Аголот на поставеност на електродната жица во однос на површината на елементите кои се заврууваат е 65°, односно аголот кој го формира со оската на ласерскиот сноп е 25°. Ласерскиот сноп односно ласерската глава е нормално насочена во однос на работниот материјал за да се постигне пенетрација по целата дебелина на материјалот и да се искористи помалиот степен на рефелексија на конструктивниот челик. Аглите на меѓусебна поставеност не се променети за

времетраење на целото експериментално истражување. Дополнително, меѓусебната поставеност на изворите на топлина влијае врз должината на слободниот крај на електродната жица и тој изнесува 15 (mm), дадено на слика 4.11. Протокот на заштитниот гас при заварување на сите проби е 25 (l/min).



Слика 4.11. Поставеност на електродната жица и ласерскиот сноп во однос на површината на заварувaните елементи, слободен крај на жицата и проток на заштитен гас

Согласно податоците наведени во Табелата 4.1, еквивалентната содржина на јаглерод на предметниот конструктивен челик изнесува 0,39 (%) и не ја надминува критичната вредност од 0,45 (%) и поради тоа експерименталното истражување е изведено без предгревање на елементите кои се заварууваат. Експерименталното истражување опфаќа едностарно хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак во еден премин со целосна пенетрација на S355J2+N при „II“ подготовка во заштита на 82 (%) Ar и 18 (%) C и хоризонтала положба PA.

Првенствено е реализирано прелиминарното истражување. Вкупно се изведени 17 хибридни завари користејќи 10 заварени проби и сите имаат засебна ознака. Вредностите на параметрите на заварување се определени врз база на теоретското истражување и истите се прикажани во Табела 4.7, соодветено за секој изведен завар со ознака. Пред да се започне со заварување секоја заварена проба е означена со мрсна боја во долниот десен агол во однос на насоката на заварување, прикажано на слика 4.12. Дополнително во табелата се наведени појавените дефекти кај секоја проба врз основа на стандард ISO 6520-1 [123].

Интервалите на промена на вредностите на независно променливите големини во прелиминарното истражување се:

- моќност на ласерски сноп, P_L(kW): 10-13 (kW);
- брзина на заварување, V_z (m/min): 1,4-2,2 (m/min);
- јачина на струја на заварување I_z (A): 260-330 (A).

Табела 4.7. Параметри на хибридното заварување при прелиминарното истражување

Ознака	Метод за подготовка на жлеб	Моќност на ласерскиот сноп (kW)	Јачина на струјата за заварување (A)	Напон на лакот (V)	Пренос на растопен ДМ	Брзина на доведување на жица (m/min)	Брзина на заварување (m/min)	Растојание помеѓу топ. извори (mm)	Позиција на фокусот на лас. сноп (mm)	Дефекти - EN ISO 6520
1-1	Машинска обработка	10	260	29.8	Пулсен лак	10	1.4	5	0	Прокапани - 504
1-2	Машинска обработка	10	300	29.8	Млаз	10	1.4	5	0	Прокапани - 504
1-3	Машинска обработка	10	260	29.8	Млаз	8	1.4	5	0	Прокапани - 504
2-1	Машинска обработка	10	300	31.8	Млаз	10	1.6	5	0	Прокапани - 504
2-2	Машинска обработка	10	300	31.8	Млаз	10	2	5	0	Прокапани - 504
3-1	Машинска обработка	11	316	33.1	Пулсен лак	13	2	3	-3	Прокапани - 504
3-2	Машинска обработка	12	329	34	Пулсен лак	14	1.8	3	-3	Прокапани - 504
4-1	Машинска обработка	13	303	32.3	Пулсен лак	12	2.2	3	-3	/
4-2	Машинска обработка	13	329	34	Пулсен лак	14	1.8	3	-3	/
6	Машинска обработка	10	329	34	Пулсен лак	14	1.8	3	-3	Прокапани - 504
7	Машинска обработка	10	329	34	Пулсен лак	14	2.2	3	-3	Прокапани - 504
11	Машинска обработка	10	303	32.3	Пулсен лак	12	1.8	3	-3	Прокапани - 504
12	Машинска обработка	10	303	32.3	Пулсен лак	12	2.2	3	-3	Прокапани - 504
20	Плазма сечење	10	303	32.3	Пулсен лак	12	1.8	3	-3	/
20-1	Машинска обработка	8	/	/	/	/	1.5	/	-3	Непровар - 5013
20-2	Машинска обработка	8	316	33.1	Пулсен лак	13	1.5	3	-3	Непровар - 5013
20-3	Машинска обработка	/	316	33.1	Пулсен лак	13	1.5	/	-3	Непровар - 5013

Вредностите кои не се наведени во Табела 4.7 се константни за сите заварени проби од прелиминарното истражување, а тие се:

- проток на заштитен гас: 25 (l/min);
- агол на поставеност на топлински извори;
- должина на слободен крај на електродната жица: 15 (mm).

Слика 4.12. Означување на секоја заварена проба со мрсна боја во долниот десен агол

Визуелната контрола изведена согласно стандардот EN ISO 17637 [119] посочи дека хибридните завари со ознака 4-1 и 4-2 од прелиминарното истражување се изведени без дефект и формата на заварот е со прифатлив квалитет, според ISO 12932 (слика 4.13). Врз основа на параметрите на заварување со кои се изведени овие два завари, утврдени се минималните и

максималните вредности на независно променливите големини од експерименталниот простор. На слика 4.13 прикажани се лицето и коренот на хибридните завари 4-1 и 4-2, а со цел да се утврдат дефекти во внатрешноста на заварот извршено е радиографско снимање. Кај заварот 4-1 се идентификувани привремени поткопувања од страна на лицето на заварот, но сепак прифатливи во Класа B од стандардот ISO 12932, додека кај заварот 4-2 не се идентификувани дефекти.

Слика 4.13. Лице, корен и радиографска снимка од хибридни завари со ознака 4-1 и 4-2

За целосно извршување на експерименталното истражување изведени се 15 хибридни завари со различни параметри користејќи 15 заварени проби. Истите претставуваат комбинации од минималните, максималните и средните вредности на независно променливите големини во експерименталниот простор кои се променуваат во следните интервали:

- моќност на ласерски сноп, P_L(kW): 11,5-13 (kW);
- брзина на заварување, V_z (m/min): 1,8-2,2 (m/min);
- јачина на струја на заварување I_z (A): 303-329 (A),

додека, вредностите на останатите параметри кои се константни за време на целото експериментално истражување се следните:

- основен материјал, конструктивен челик S355J2 со дебелина од 12 (mm);
- димензии на елементи кои сочелно се заваруваат пред заварување 150x400 (mm);
- број на премини: 1;
- вид на ласер: *fiber ласер*;
- растојание на фокус на ласерски сноп: -3 (mm);
- агол на поставеност на ласерска глава во однос на вертикална оска: 0^o;
- додатен материјал – полна жица со дијаметар 1,2 (mm) во квалитет G 42 3 M21 3Si1 согласно стандард EN ISO 14341;
- агол на поставеност на електрода во однос на основен материјал: 65^o;

- состав на заштитен гас: 82 (%) Ar и 18 (%) CO2, M2-1 согласно стандард EN ISO 14175;
- проток на заштитен гас: 25 (l/min);
- редослед помеѓу ласерски сноп и електричен лак: *електричен лак напред*;
- растојание помеѓу извори на топлина: 3 (mm);
- должина на слободен крај на електродна жица: 15 (mm);
- пренос на растопени капки од додатен материјал: *пулсен лак*;
- динамичка крива - карактеристика на извор на струја за заварување: -10
- метод за подготовка на жлеб за заварување: *машинска обработка – глодање*.

За време на експерименталното истражување, подесувањето на параметрите за заварување е изведувано преку управувачка-контролна единица на ласерот и преку оперативен модел Premium за електричниот лак, дадени на слика 4.14. Влезните параметри за јачината на струјата за заварување и електричниот лак се подесуваат преку избор на брзината на доведување на жицата за заварување користејќи програм на внатрешни карактеристични криви на електричниот лак, додека брзината на доведување на жицата се врши мануелно преку оперативниот модел Premium (слика 4.14). Брзината на заварување се избира и контролира преку далечински управувач на роботскиот манипулатор.

Иако јачината на струјата на заварување се подесува пред процесот на заварување, нејзините вредности за време на процесот на заварување автоматски се променуваат во зависност од брзината на заварување и моќноста на ласерскиот сноп преку карактеристиката на лакот. Излезните вредности на јачината на струјата за заварување и напонот на електричнот лак се отчитуваат од екранот на оперативниот модел Premium, (слика 4.14). Во Табела бр. 4.8 се дадени вредностите на параметрите за заварување за сите 15 хибридни завари, а исто така покрај стандардната ознака, во табелата се означени и комбинациите на ортогоналните матрици од ортогоналниот и Taguchi метод, додека матриците се прикажани во Табела 4.9 и Табела 4.10.

Слика 4.14. Подесување на параметри на заварување и излезни вредности на јачина на струја за заварување и напон на електричен лак

Табела 4.8. Параметри на хибридно заварување при експерименталното истражување

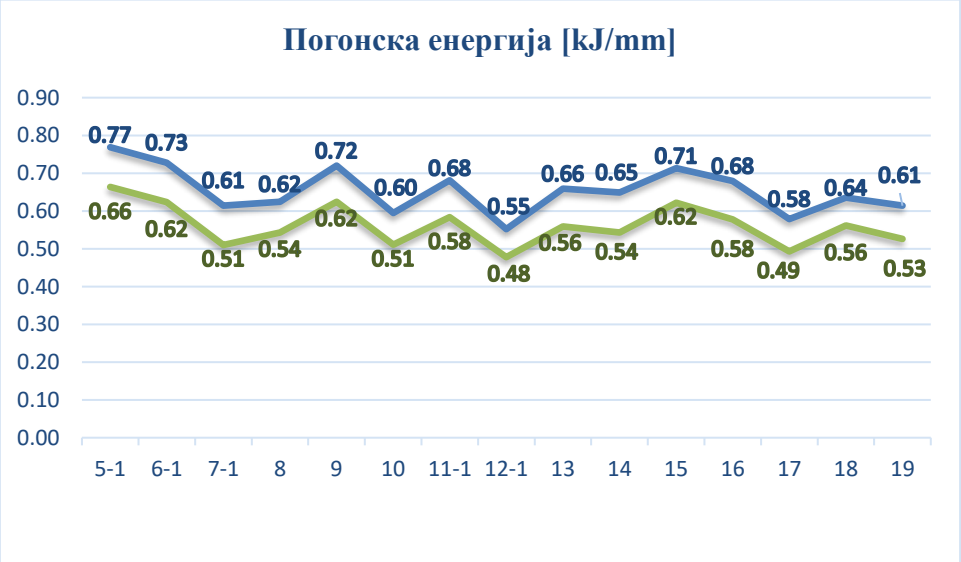
Ознака	Ознака за ортогонален метод	Ознака за Taguchi метод	Моќност на ласерскиот сноп (kW)	Јачина на струјата за заварување (A)	Напон на лакот (V)	Брзина на заварување (m/min)	Брзина на доведување на жица (m/min)	Коригирана јачина на струјата за заварување (A)	Коригиран напон на лакот (V)	Погонска енергија (kJ/mm)	Избрана погонска енергија (kJ/mm)
5-1	6	7	13	329	34	1.8	14	390	38.2	0.77	0.66
6-1	5		11.5	329	34	1.8	14	390	38.1	0.73	0.62
7-1	7	3	11.5	329	34	2.2	14	411	38.1	0.61	0.51
8	8		13	329	34	2.2	14	388	37.9	0.62	0.54
9	2		13	303	32.3	1.8	12	359	36.7	0.72	0.62
10	4		13	303	32.3	2.2	12	365	36.8	0.60	0.51
11-1	1	1	11.5	303	32.3	1.8	12	359	36.8	0.68	0.58
12-1	3		11.5	303	32.3	2.2	12	352	36.9	0.55	0.48
13	9		12.2	316	33.1	2	13	384	37.4	0.66	0.56
14		2	11.5	316	33.1	2	13	391	37.4	0.65	0.54
15		4	12.2	316	33.1	1.8	13	362	37.8	0.71	0.62
16		5	12.2	329	34	2	14	399	38	0.68	0.58
17		6	12.2	303	32.3	2.2	12	365	36.9	0.58	0.49
18		8	13	303	32.3	2	12	345	36.8	0.64	0.56
19		9	13	316	33.1	2.2	13	380	37.5	0.61	0.53

Во Табела 4.8 наведени се пресметаните вредности на погонската енергија, односно количеството на енергија внесена на единица должина од заварот. Погонската енергија покрај моќноста од изворите на топлина и брзината на заварување зависи и од коефициентот на ефективност η_{ef} кој за електричнот лак е во граници од 0,65 до 0,85, а за fiber ласер зависи од степенот на рефелексија на материјалот и температурата на материјалот [120]. Поради тоа што експериментот се изведува со конструктивен челик S355J2 кој има степен на рефлексија од 30 до 40 (%), а истиот претходно е загреан на висока температурата од електричниот лак коефициентот на ефективност на fiber ласерот е во интервал од 0,80 до 0,90.

Согласно наведеното, погонската енергија од експерименталното истражување е пресметана со изразот:

$$Q_P = Q_L + Q_A = \frac{P_L \, x \, \eta_{ласер} \, x \, 60}{1000 \, x \, V_z} + \frac{I_z \, x \, U \, x \, \eta_{лак} \, x \, 60}{1000 \, x \, V_z} \; [\text{kJ/mm}] \qquad (4.1)$$

каде што $\eta_{ласер}$= 0.80, а $\eta_{лак}$ = 0.85.



Слика 4.15. Количество на енергија внесена на единица должина од заварот Q_P

Исто како и кај прелиминарното истражување, заварените проби се означени со стандардна ознака во долниот десен агол во однос на насоката на заварување. Комбинациите од ортогоналните матрици од ортагоналниот и Taguchi метод се означени со посебни редни броеви во однос на стандардната ознака, секоја кодирана комбинација од матрицата има ознака во Табела 4.9 и Табела 4.10.

Превенствено се изведени 8+1=9 хибридни завари за матрицата од ортогоналниот метод, модел 2^3, односно промена на три независно променливи големини на две нивоа, максимално и минимално ниво и плус средна точка од експерименталниот модел.

Табела 4.9. Ортогонална матрица со кодирани и реални вредности на независно променливите големини

Ознака за ортогонален метод	Кодирани вредности			Стандардна ознака	Вредности на независно променливи		
	X1	X2	X3		P_L(kW)	V_z (m/min)	I_z (A)
1	-1	-1	-1	11-1	11.5	1.8	303
2	1	-1	-1	9	13	1.8	303
3	-1	1	-1	12-1	11.5	2.2	303
4	1	1	-1	10	13	2.2	303
5	-1	-1	1	6-1	11.5	1.8	329
6	1	-1	1	5-1	13	1.8	329
7	-1	1	1	7-1	11.5	2.2	329
8	1	1	1	8	13	2.2	329
9	0	0	0	13	12.2	2	316

По заварувањето на пробите за ортогоналниот метод, продолжено е со заварување на хибридните завари за матрицата од Taguchi методот, односно матрица L9, т.е. три независно променливи големини на три нивоа. Оваа матрица се состои од 9 комбинации од кои 3 се поклопуваат со матрицата од ортогоналниот метод и поради тоа се изработени само 6 дополнителни заварени проби.

Табела 4.10. Матрица L9 според Taguchi со кодирани и реални вредности на независно променливите големини

Ознака за ортогонален метод	Кодирани вредности			Стандардна ознака	Вредности на независно променливи		
	X1	X2	X3		P_L(kW)	V_z (m/min)	I_z (A)
1	1	1	1	11-1	11.5	1.8	303
2	1	2	2	14	11.5	2	316
3	1	3	3	7-1	11.5	2.2	329
4	2	1	2	15	12.2	1.8	316
5	2	2	3	16	12.2	2	329
6	2	3	1	17	12.2	2.2	303
7	3	1	3	5-1	13	1.8	329
8	3	2	1	18	13	2	303
9	3	3	2	19	13	2.2	316

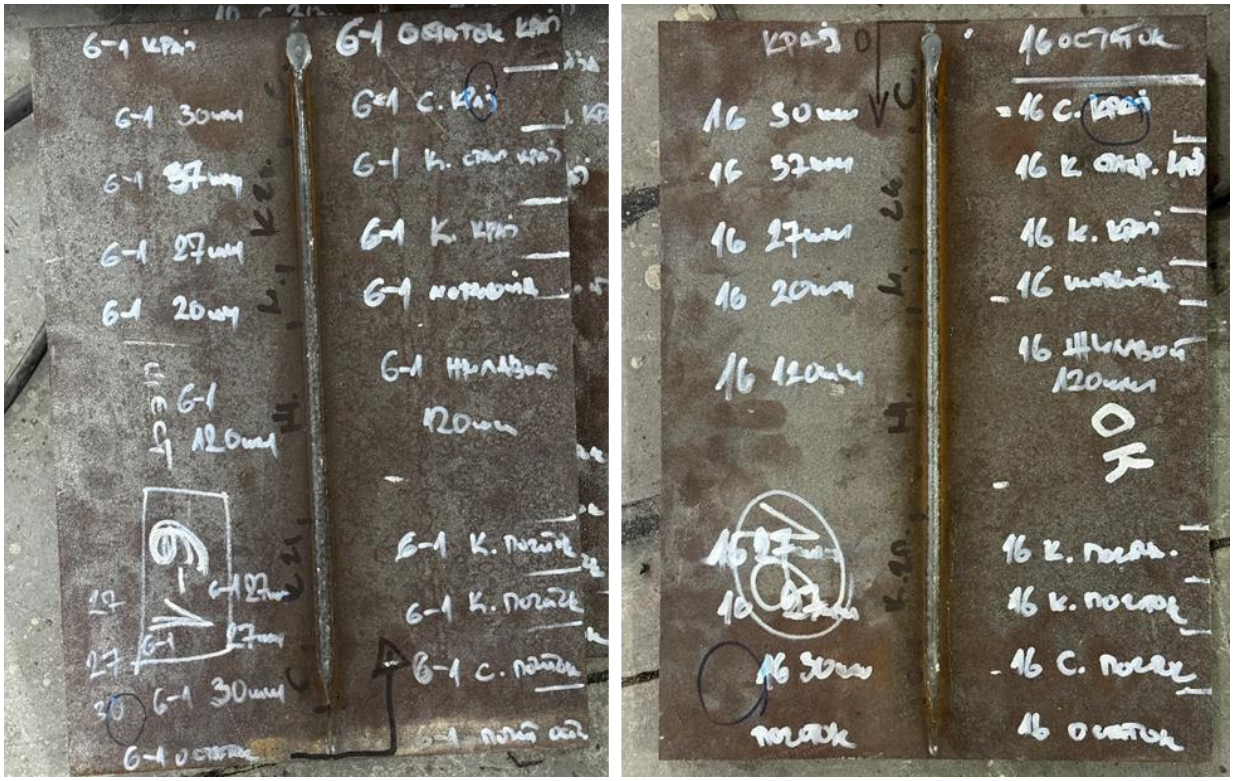
4.4. Испитување на изведените хибридни завари

Согласно стандардно заварените проби потребно е да поседуваат минимална должина од 350 (mm) со што би се обезбедила добра распределба на топлина и доволна површина за да може да се изработат сите потребни епруветни за испитување со разорување. Сепак, со цел да се занемари делот на забрзување и забавување на изворите на топлина, заварните проби се изработени со должина од 400 (mm) и е обележана насоката на валање со цел да не настане грешка при изработка на епруветите за жилавост од зоната под влијание на топлина.

Локациите од кои се изработуваат епруветите за испитување на механичките карактеристики на заварот се прикажани на слика 2.19., но поради тоа што за испитување на затегнувачка јакост се изработуваат дополнителни нестандардни епруветни, одредени локации за нивна изработка се променети.

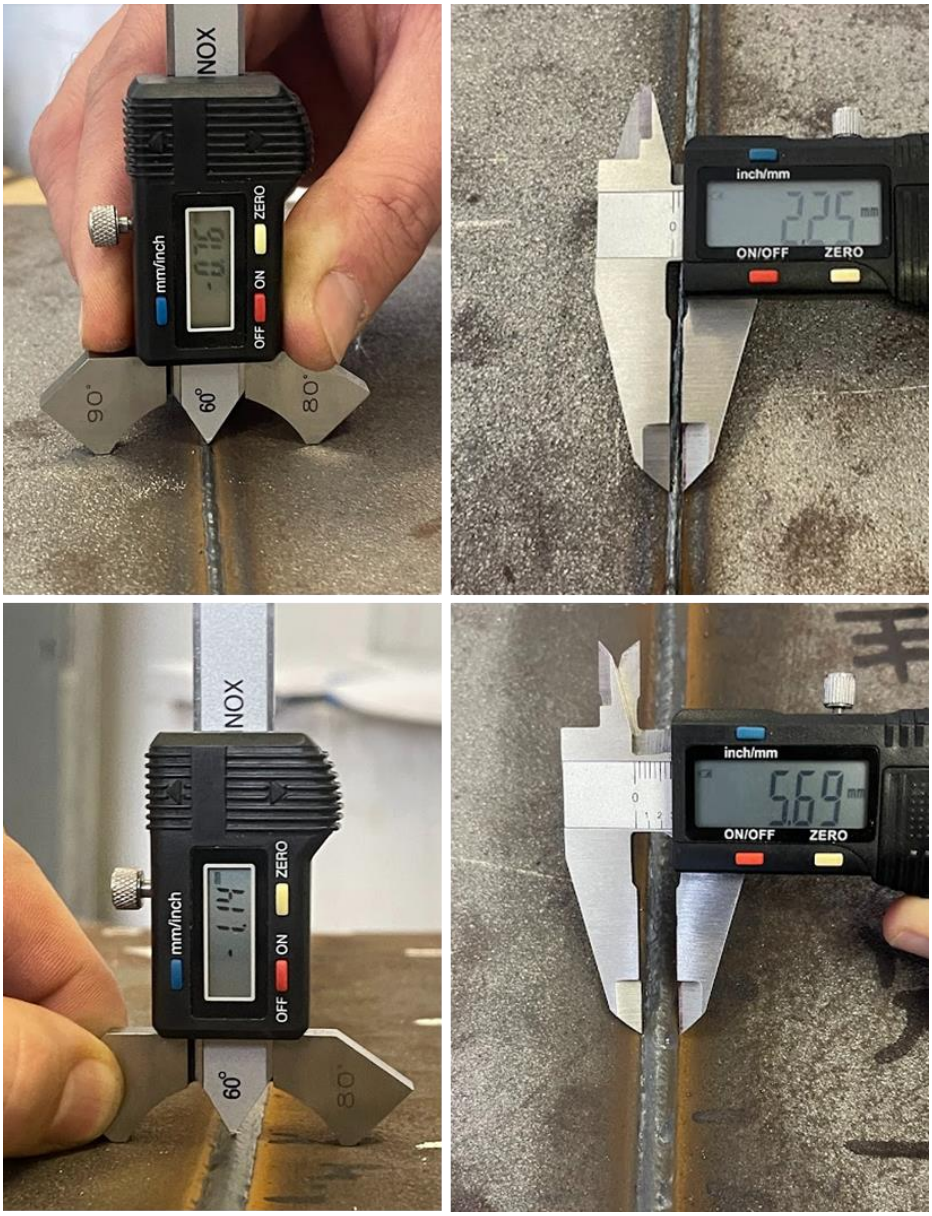
Пред да се изработат епруветите за механички испитувања, заварените проби се испитуваат без разорување, визуелна контрола во согласност со стандардите ISO 17637 и ISO 12932 и радиографска контрола во согласност со стандардите ISO 17636-1 и ISO 10675-1, со цел да се утврди дали на одредени локации има несовршености. Доколку се идентификуваат дефекти, дали истите се дозволени согласно критериумите за испитување без разорување [115, 116]. Кај одредени заварени проби поради прифатливи дефекти извршена е промена на локации за изработка на епруветите за испитување на механичките карактеристики.

По извршеното хибридно заварување и визуелната и радиографска контрола, кај сите заварени проби со мрсна боја се означени локациите за изработка на епруветите за испитување, дадено на слика 4.16.



Слика 4.16. Означени локации за изработка на епрувети за испитување кај хибридно заварените проби

Визуелната контрола е најстара техника на испитување без разорување, која се одликува со екстремна ефективност и ниска цена на чинење во споредба со останатите методи за испитување на заварените проби [121]. При изведување на експерименталниот истражување пристапено е кон целосна визуелна контрола, започнувајќи од подготовка на елементите за заварување и самиот процесот на заварување, до финална контрола и мерење на димензиите на хибридниот завар. Со помош на дигитално подвижно мерило (шублер) е извршено димензионално мерење на лицето и коренот на хибридниот завар, односно е мерена височината и ширината на надвисувањето и проварот на заварот, прикажано на слика 4.17. Димензионалното мерење е извршено на 4 локации по должина на заварот, на растојаниа од 50, 150, 250 и 350 (mm) во однос на почетната точка.

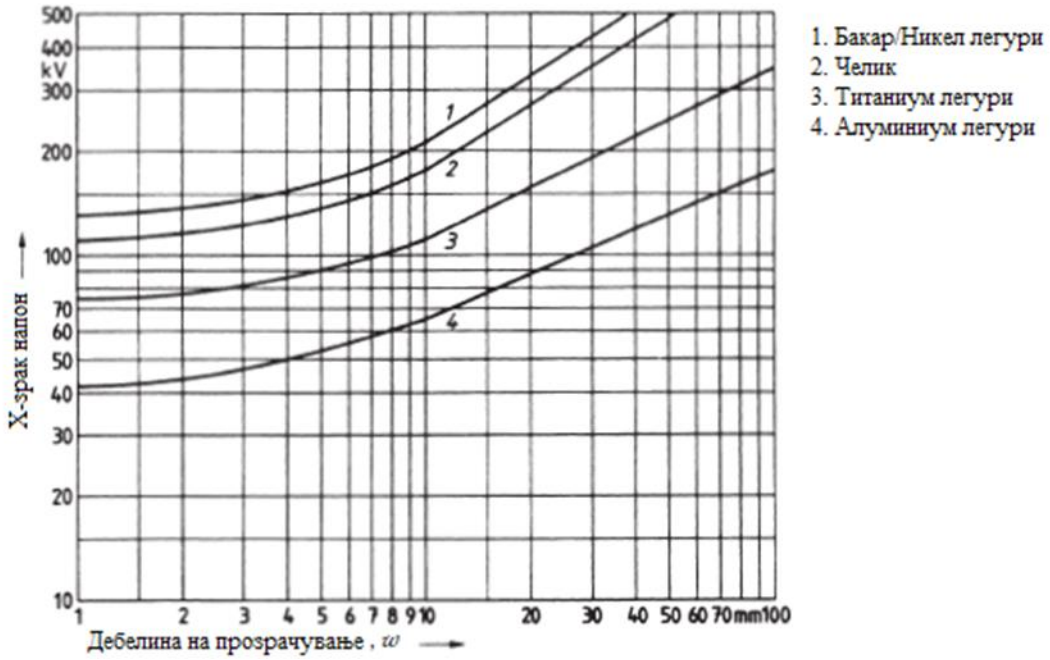


Слика 4.17. Димензионални мерења на лицето и коренот на хибридните завари

По извршеното димензионално мерење на лицето и коренот на хибридните завари е пристапено кон испитување без разорување односно радиографска контрола во согласност со стандардите ISO 17636-1 и ISO 10675-1. Тоа е изведено во лабораториите на РЖ Техничка Контрола АД Скопје.

Рендгенските зраци имаат мала бранова должина и соодветно висока енергија, односно може да продираат низ челичниот материјал, дел од нивната енергија се апсорбира во испитуваниот материјал, а дел поминува низ него и се отсликува на радиограмот кој е поставен од спротивната страна. Практиката нагласува, за да се добие квалитетен радиограм потребно е прецизно да се одреди времето на прозрачување односно експонажа. Времето на прозрачување зависи од неколку фактори, како што се: видот на материјалот и негова дебелина, напон на цевката и јачина на струјата, фокус и растојание од изворот на зраците до испитуваниот материјал, видот на филмот и неговата чуствителност и итн.

Сите заварени проби се прозрачени и испитани со апарат X-Ray 2505. Со цел да се добие квалитетен радиограм, напонот за прозрачување на челик S355J2 со дебелина од 12 (mm) е определен согласно следниот графикон.



Слика 4.18. Графикон за определување на напонот на прозрачување

За напон на прозрачување од 140 (kV), јачина на струјата од 5 (mA), и растојание помеѓу апаратот и филмот од 550 (mm), за дебелина од 12 (mm) и квалитет на челик S355J2 потребната експозиција изнесува 36 (mAs), или времето на прозрачување изнесува 7,2 (s).

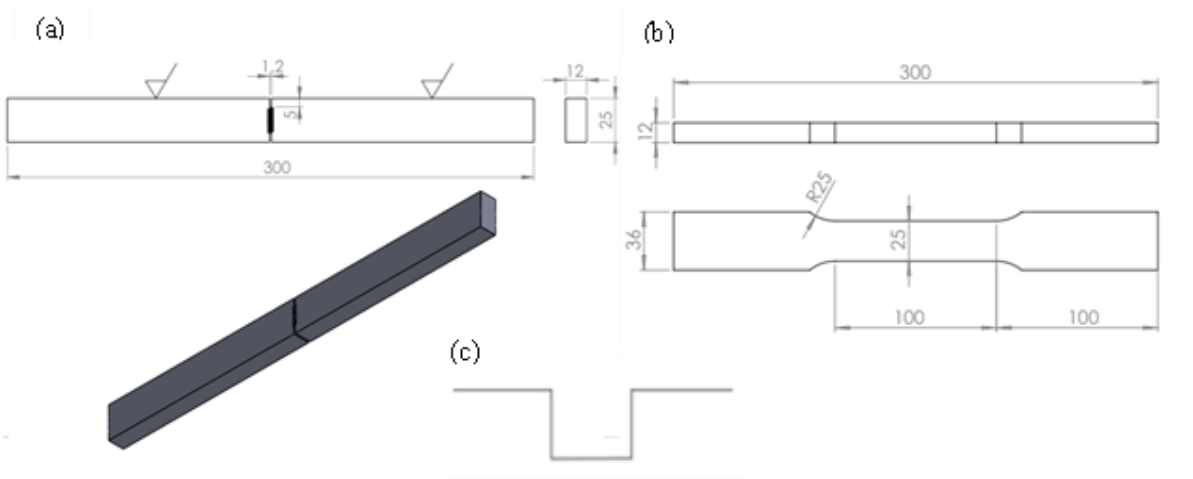
По извршената визуелна и радиографска контрола пристапено е кон изработка на епруветите за механички испитувања. Првенствено заварените проби се исечени на машинска

пила со додаток од 2 (mm) во ширина на епруветите (слика 4.19), а потоа конечната димензија е постигната со обработка на CNC машини.

Слика 4.19. Изработка на епрувети за механички испитувања на машинска пила

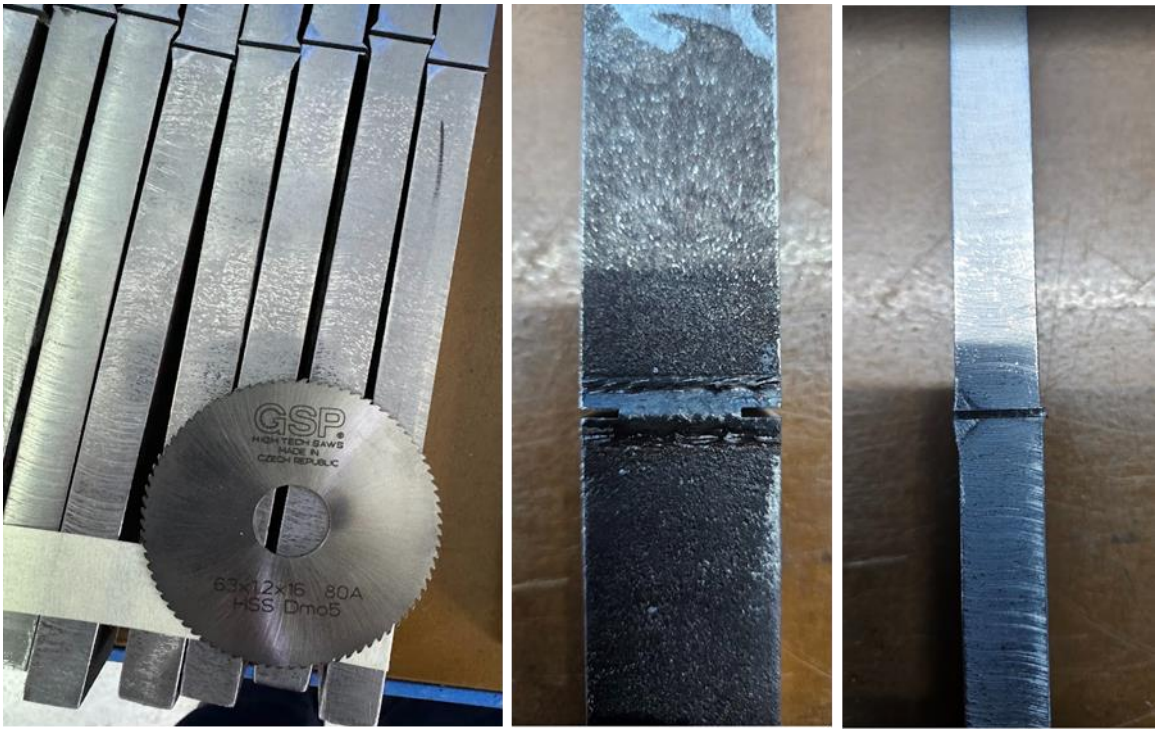
Испитување на затегнување претставува испитување под дејство на аксијална затегнувачка сила и тоа е едно од најстарите и најприменуваните статички испитувања поради тоа што дава голем број на информации за механичките карактеристики на испитуваниот материјал. Овој тип на испитување има за цел одредување на карактеристиките на отпорност и деформации под дејство на аксијална затегнувачка сила: карактеристики на деформации (контракција и издолжување), карактеристики на отпорност, граница на пропорционалност, граница на еластичност, граница на развлекување, затегачка цврстина (R_m) и модул на еластичност.

За испитување на затегнувачка јакост на хибридниот завар изработени се три епрувети од секоја заварена проба, од три локации со цел да се извршат три испитувања за попрецизно утврдување на затегнувачката јакост на хибридниот завар. Врз основа на претходни искуства од практиката се претпоставува дека заварот ја надминува затегнувачката јакост на основниот материјал и поради тоа изработени се нестандардни епрувети со избрусено лице и корен, со симетричен правоаголен жлеб од двете страни 5x2 (mm) за намалување на попречниот пресек во зоната на заварот и точно утврдување на затегнувачката јакост на заварот [117], прикажани на слика 4.20 и слика 4.21. Покрај трите нестандардни епрувети од секоја заварена проба е изработена и стандардна епрувета за споредба на затегнувачката јакост на основниот материјал со заварот [104].



Слика 4.20. а) Нестандардни епрувети за испитување на затегнувачка јакост на заварот; b) стандардна епрувета; c) жлеб согласно стандард ISO 9017

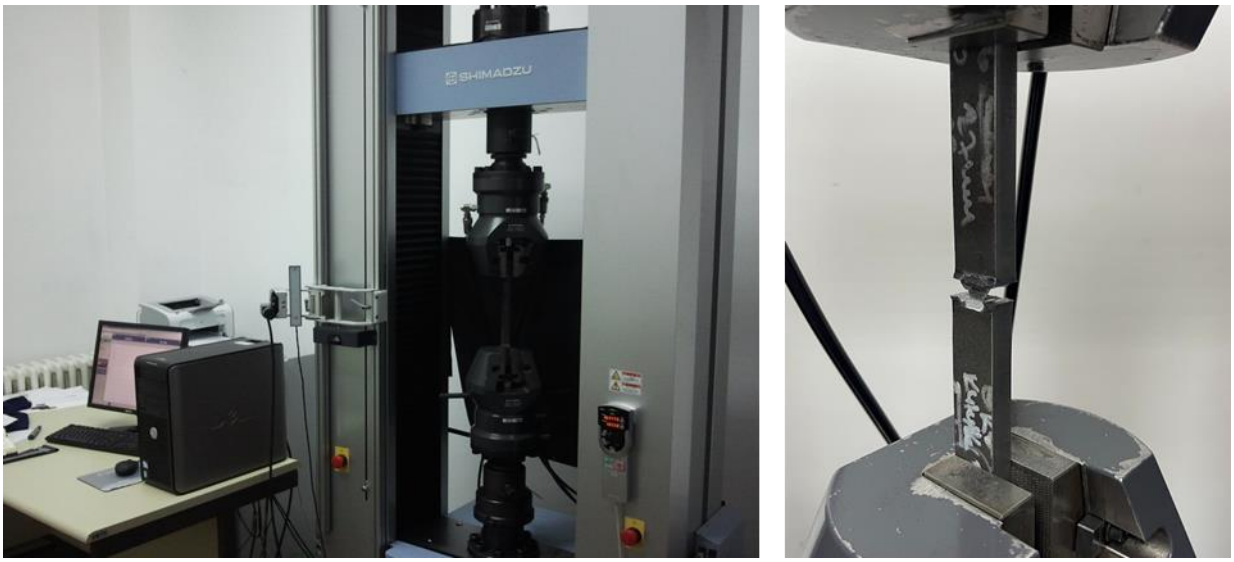
Симетричниот жлеб е изработен со користење на пилесто глодало 1,2x63 (mm) и сите епрувети имаат соодветна ознака, односно трите нестандардни епрувети за испитување на затегнувачката јакост од секоја заварена проба се означени со „a“, „b“ и „c“, прикажано на слика 4.21. Хибридниот завар не е предвиден да биде избрусен од страна на лицето и коренот.



Слика 4.21. Изработен симетричен жлеб со помош на пилесто глодало кај нестандардна епрувета

Испитувањата за утврдување на затегнувачката јакост на хибридниот завар се изведени на машина за испитување на затегнувачка јакост SHIMADZU AG-X Floor Tube при Машинскиот факултет во Скопје со брзина на испитување од 10 ($N/mm^2/sec$). Кај секоја епрувета пред да биде поставена на машината се врши мерење на ширината и висината на хибридниот завар помеѓу

изработените жлебови. По испитувањето, автоматски се генерира дијаграм напон-единечно издолжување.

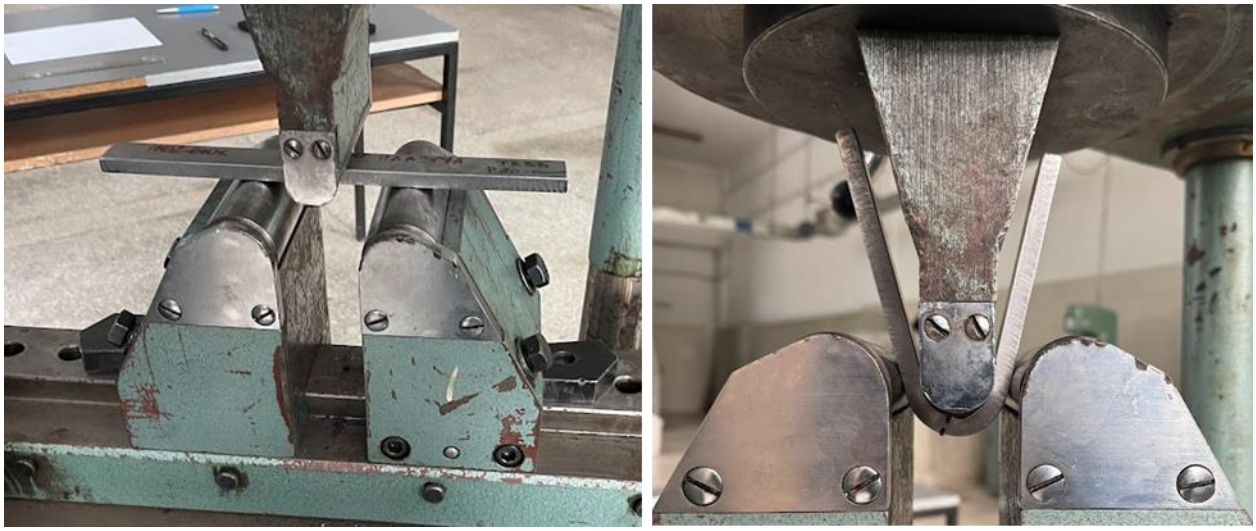


Слика 4.22. Машина за испитување на затегнувачка јакост SHIMADZU AG-X Floor Tube

Испитување на свиткување на хибридниот завар се изведува со цел да се проверат деформационите способности на заварот и е дел од технолошките испитувања, при што јакоста на свиткување претставува основна карактеристика на отпорност на свиткување. Овој тип на испитување е изведен во согласност со стандард ISO 5173.

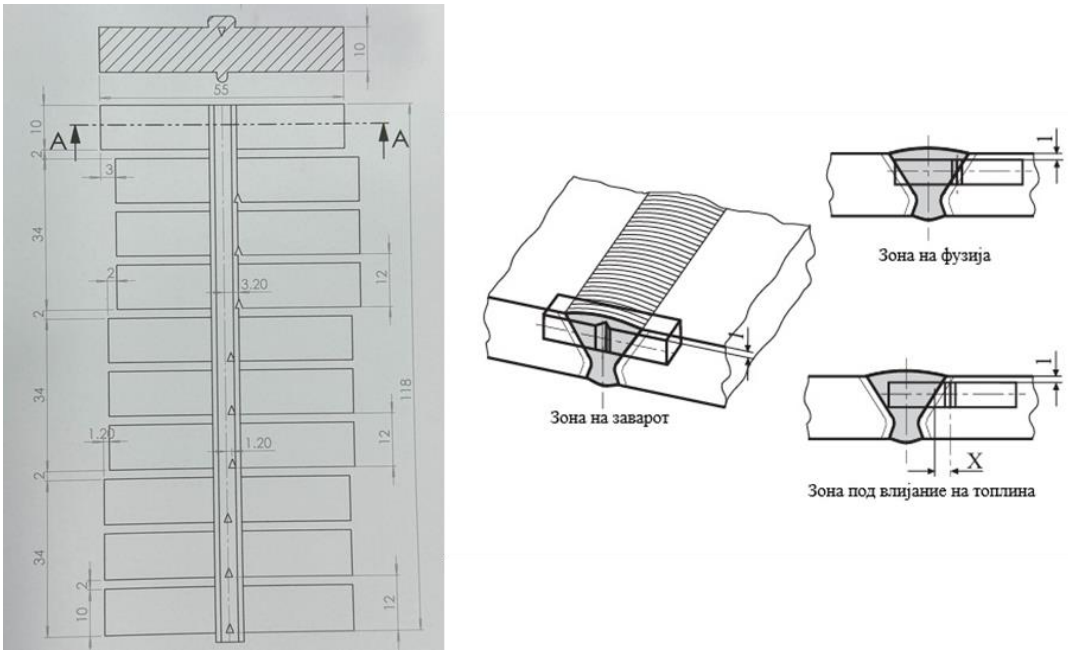
Од секоја заварена проба изработени и испитани се по две епрувети, една за испитување од страна на коренот (RBB) и една од страна на лицето на заварот (FBB) за утврдување на технолошките карактеристики на заварот. Сите епрувети се изработени со стандардна димензија и геометрија 12x30x300 (mm). Испитувањето е изведено со притискач (цилиндер) со дијаметар од 30 (mm) и брзина на притиснување од 1 (mm/s), се до појава на пукнатини, а потоа се мери аголот на свиткување или доколку не се појават пукнатини до паралелност на страните на епруветата, односно до агол на свиткување од 180^{o}. Страната на епруветата на која што притиска притискачот е машински обработена односно нема нерамнини, додека другата страна не е обработена и евентуални поткопувања на лицето и коренот се вклучени во испитувањето.

Бидејќи испитувањето се врши до појава на првата пукнатина, односно до одреден агол α, надворешната површина на свитканиот дел (затегната зона) мора да биде добро видлива во текот на целата постапка на испитување, поради тоа што квалитетот на завареният спој се одредува според аголот на свиткување. Со цел ова барање да биде исполнето растојанието помеѓу потпирачите е определено согласно стандардот и изнесува $d + 2t \leq l \leq d + 3.5t$, односно $54 \leq l \leq 72$ (mm). Силата дејствува на средина меѓу потпирачите. При испитувањето на свиткување горните слоеви на епруветата се оптоварени на притисок, во средина се наоѓа неутрална оска, а долните слоеви се оптоварени на затегнување. Најголемите деформации ќе бидат на местата на најголемите напони т.е. во површинските слоеви на епруветата.



Слика 4.23. Технолошко испитување на свиткување на хибридни завари

Испитувањето на жилавост има за цел да ја определи отпорноста на хибридно завареният спој на кршење при ударно оптоварување, и тоа како во металот на заварот (јадрото), така и во зоната под влијание на топлина. За определување на жилавоста на завареният спој по Шарпиев метод, епруветите се изработуваат со „V“ жлеб со димензии согласно стандард ISO 9016, (слика 2.23). Со цел целосно да се испитаат заварените проби на жилавост, од секоја заварена проба вкупно се изработени 10 епрувети земени од 4 локации, кај 3 локации жлебот е изработен нормално на оската на заварот (слика 4.24a). Локациите од кои се изработени по 3 епрувети со жлеб нормален на оската на заварот се: зона на заварот – VWT, зона на линија на фузија – VHT и зона под влијание на топлина (слика 4.24b). Една епрувета е изработена со жлеб паралелно на оската на заварот во зона на заварот – VWS. Ознаките според локацијата на изработка се дадени во поглавие 2.4 од докторската дисертација.

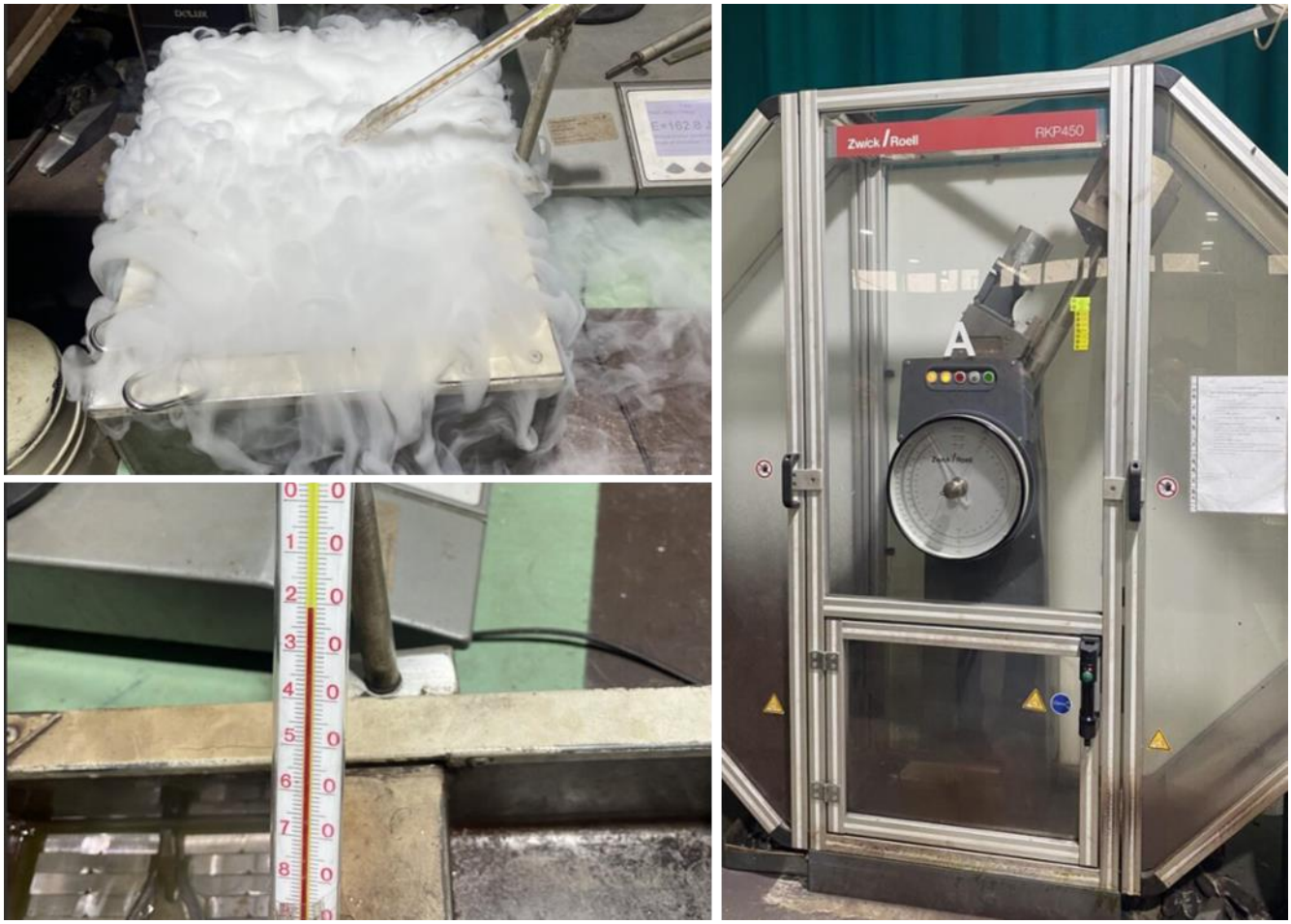


Слика 4.24. Локации за изработка на епрувети за испитување на жилавост

Епруветите за испитување на жилавост се изработени со машинска обработка и означени според локацијата на изработка. Поради тоа што основниот материјал е S355J2, испитувањето на жилавост се изведува на температура од -20 (°C), а подладувањето на епруветите се врши со помош на течен азот, прикажано на слика 4.25. За кршење на епруветите е користено нишало со потенцијална енергија од 300 (J).

Шарпиевиот метод се базира на мерење на енергијата што ја апсорбира материјалот при кршење, односно потрошена енергија по единица површина (W_o) од попречниот пресек на епруветата (A) кај местото на жлебот, и истата се пресметува според следниот израз:

$$\rho = \frac{Wo}{A} \left[\frac{J}{cm^2}\right] \tag{4.2}$$

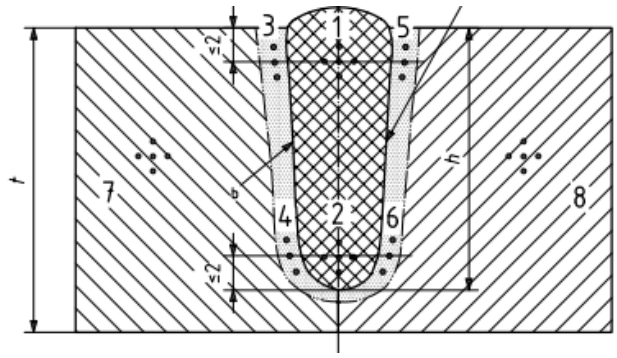


Слика 4.25. Епрувети за испитување на жилавост на -20 (°C) и Шарпиево нишало на кое е извршено испитувањето

Испитувањето на тврдина не се користи само како метод за запознавање на карактеристиките на заварот, туку и за нивна контрола. Практичното значење на ова испитување е во тоа што, според вредноста на тврдината измерена на различни температури може да се дадат оценки за многу важни физички и механички карактеристики на заварот.

Претходно беше напоменато, дека заварот изведен со хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак не подлежи на испитување на тврдина согласно стандард ISO 15614-14.

Иако не е пропишано со стандард заварените проби се испитуваат на тврдина по Викерсов метод со сила на втиснување од 98 (N) HV10 согласно стандард ISO 15614-1 односно ISO 9015-1 и ISO 22826. Првиот се користи за испитување во зона на електричниот лак, а вториот во зона на ласерскиот сноп [109, 122]. За мерење на тврдина е применета форма на испитување во редови, односно испитувањето е извршено во три реда. Ред во горниот дел од заварот или зона на електричниот лак на длабочина < 2 (mm) од лицето на заварот, ред во долната зона или зона на ласерскиот сноп на длабочина < 2 (mm) од коренот на заварот и ред по средина на заварот. При испитувањето се запазени одредени насоки од пропишаните стандарди, во секој ред се врши мерење во три зони, зона на заварот, зона под влијание на топлина и зона на основниот материјал и тоа во секоја зона се извршени 3 индивидуални отпечатоци (d_V) за мерење на тврдина. Дополнително е внимавано на растојанието помеѓу отпечатоците со цел да се избегне влијанието на зајакнување во материјалот, и тоа минимално 1 (mm) во горна зона и > $3d_V$ во средна и долна зона, дадено на слика 4.26 и 4.27.



Слика 4.26. Локации на индивидуални отпечатоци во зона на ласерскиот сноп

Испитувањето на тврдина е изведено на температура од 20±5 (°C) со HV10 според ISO 9015-1 и ISO 22826. Површините на епруветите за мерење на тврдина пред испитувањето се брусени, полирани и нагризани со раствор (HNO_3), а потоа измиени со алкохол. Мерните места на кои е извршено испитувањето се прикажани на слика 4.27. При испитувањето притискачот е во форма на дијамантска пирамида со квадратна основа и агол на врвот помеѓу спротивните страни од 136°. Измерената тврдина е дефинирана со односот на силата на втиснување F (N) и површината на отпечатокот S (mm^2).

$$HV = \frac{F}{S} \tag{4.3}$$

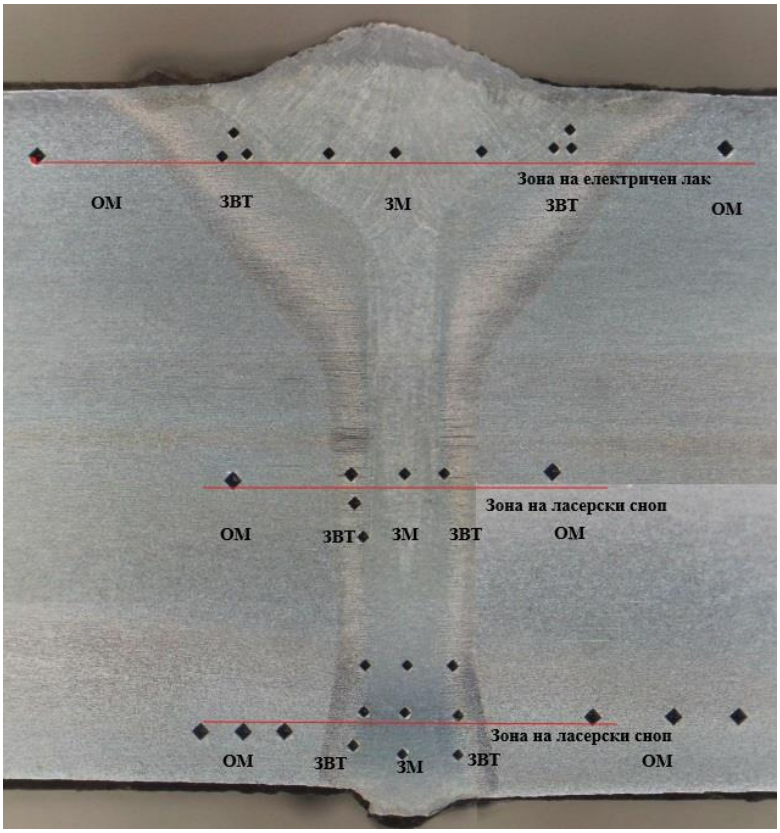
Површината на отпечатокот може да се пресмета од следниот израз:

$$S = \frac{d^2}{2\cos 22^o} \tag{4.4}$$

и како резултат на тоа се добива Викерсовата формула за тврдина:

$$HV = 1.854\ \frac{F}{d^2} \tag{4.5}$$

Вообичаено е тврдината по Викерс да се изразува како бездимензионален број. Меродавна должина на дијагоналата се изразува како аритметичка средина на двете дијагонали на отпечатокот.



Слика 4.27. Редови и локции на индивидуални отпечатоци кај хибриден завар

Испитувањата за реализација на експериментот се комплетираат со испитување на металографија на заварените проби. Металографијата се испитува со цел да се одреди микроструктурата на хибридниот завар и зоната под влијание на топлина и нејзиното влијание на механичките карактеристики на заварот.

Металографијата се изведува на епруветите кои се наменети за испитување на тврдина со димензии 12x20x60 (mm). Извршени се испитувања во горна и долна зона на заварот на три локации: основниот материјал, зоната под влијание на топлина и металот на заварот, прикажано на слика 4.28. Подготовката на епруветите се состои од неколку чекори. Првенствено се врши сечење со машинска пила, по коешто следува машинска обработка на пресечените површини за да не се предизвика промена на структурата од загревање. Потоа епруветите се мијат во ултразвучна када со алкохол и се сушат со топол воздух. Следна фаза е посебно рачно брусење на секоја епрувета со абразивна хартија (SiC – Papier) со различна гранулација.

Табела 4.11. Фази на брусење на епруветите за металографија

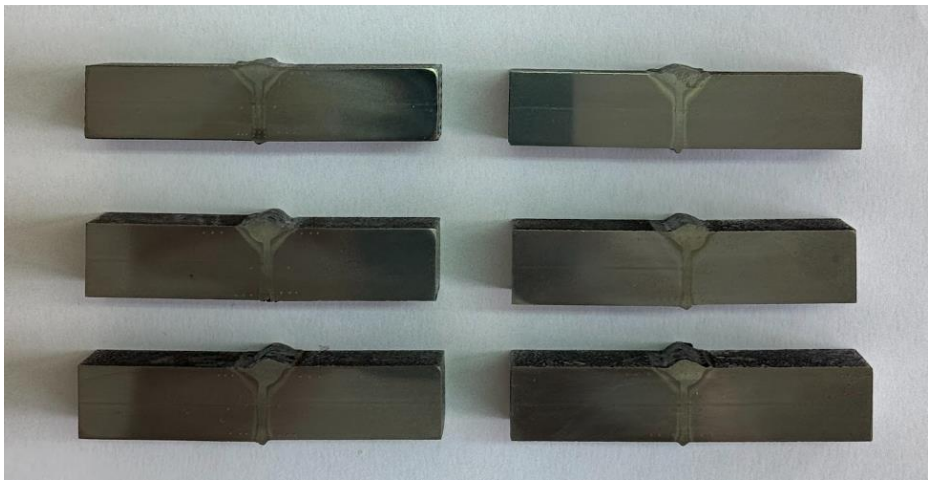
	подфаза 1	подфаза 2	подфаза 3	подфаза 4	подфаза 5	подфаза 6	подфаза 7	подфаза 8
Подлога	SiC - Papier	SiC - Papier	SiC - Papier	SiC - Papier	SiC - Papier	SiC - Papier	SiC - Papier	SiC - Papier
Средство	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC
Големина на зрната (гранулација)	100	150	280	320	400	600	1000	1200
Течност	дес. вода	дес. вода	дес. вода	дес. вода	дес. вода	дес. вода	дес. вода	дес. вода
Бр. на вртежи	200	200	250	300	300	300	300	350
Време [min]	до сјајна површина	до сјајна површина	2x3	2x3	2x3	2x3	2x3	2x3

Брусењето се изведува за да се добие сјајна површина и да се отстранат нечистотиите и маснотиите кои се присутни на лицето на епруветата. Почетната гранулација зависи од состојбата на површината која треба да се испитува. Започнато е со гранулација 100, 150, 280 и завршено е со 1200. Насоката на брусење во однос на секоја наредна абразивна хартија е под 90^{o} со цел да може да се види дали претходната фаза ги отстранила несовршеностите. Помеѓу секоја промена на абразивната хартијата извршено е миење на епруветите во ултразвучно купатило со алкохол во време од 3÷5 (min). После миењето епруветите се сушат на топол воздух.

Табела 4.12. Полирање на епруветите за металографија

	подфаза 9	подфаза 10
Подлога	чоја	чоја
Полир средство	Al_2O_3 глиница n^{o}2	
Зрна	3μ	1μ
Течност	Al_2O_3 + дес. вода	
Бр. на вртежи	250	500
Време [min]	7	7

Фазата полирање се врши во две насоки. Првиот пат епруветата и дискот ротираат во иста насока, а вториот пат епруветата и дискот ротираат во спротивна насока. Епруветите се полираат 7 минути со Al_2O_3 глиница, после миењето со алкохол и сушењето со топол воздух се врши нагризување на полираната површина со потопување во раствор.

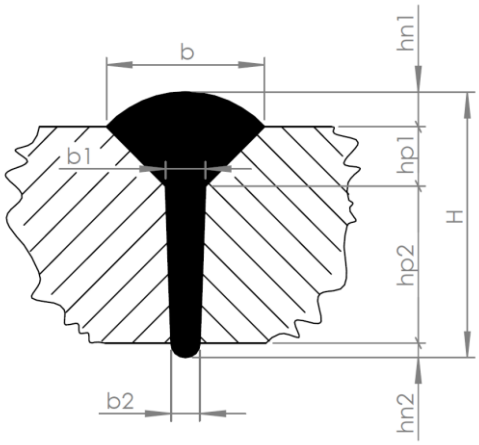


Слика 4.28. Епрувети за испитување на металографија

За нагризување на епруветите е употребен раствор составен од HNO_3 и етил алкохол (100 ml етил алкохол + 5 ml HNO_3). Процесот на нагризување трае околу 7 секунди, по што површините се исчистени со алкохол. По подготовката, примероците се анализирани и фотографирани со оптички микроскоп OMAX M837, опремен со дигитална камера OMAX 5MP A3550, даден на слика 4.29. Микроструктурните испитувања се извршени при зголемувања од 40x, 100x и 400x. За анализа и обработка на сликите е користен софтверскиот пакет Levenhuk ToupView 3.7.

Слика 4.29. Микроскоп OMAX M837 и дигитална камера OMAX 5MP A3550

Со овој софтверски пакет е извршено димензионално мерење преку макрографските снимки на хибридните завари за определување на ширина и надвисување на лицето на заварот, како и ширина и провар на коренот и утврдување на квалитетот на заварот според ISO 12932. Дополнително е извршено мерење на вкупната пенетрација и пенетрацијата во зона на електричниот лак и зона на ласерскиот сноп. Димензиите кои се мерени се прикажани на слика 4.30.



Слика 4.30. Шематски приказ на геометриски димензии на хибриден завар

5. Резултати и анализа на податоци

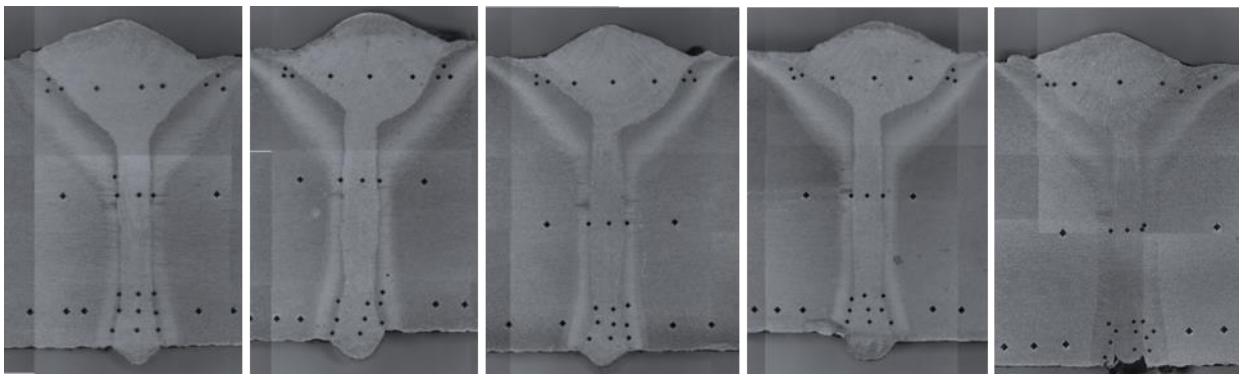
5.1. Резултати и анализа на податоци од визуелна контрола

Визуелната контрола е извршена согласно стандард EN ISO 17637 на сите заварени проби. Првенствено е извршена кај прелиминарното истражување со цел добивање на хибриден завар без дефекти и истото е потенцирано во поглавие 4.3.1 дека хибридните завари со ознака 4-1 и 4-2 се изведени без дефекти и формата на заварот е со прифатлив квалитет според ISO 12932. Врз основа на овие два хибридни завари од прелиминарното истражување утврдени се минималните и максималните вредности на независно променливите големини од експерименталното истражување. Поради тоа, предмет на анализа се само резултатите од визуелната контрола, односно димензионалното мерење извршено кај 15-те хибридни завари од експерименталното истражување според геометриските димензии дадени на слика 4.30.

Табела 5.1. Резултати од димензионално мерење на хибридните завари

Ознаки (mm)		5-1	6-1	7-1	8	9	10	11-1	12-1	13	14	15	16	17	18	19
Зона на електричниот лак	b	8.4	9.9	7.4	8.5	7.11	6.62	9.32	6.96	9.05	9.28	7.79	6.9	9.04	6.86	9.19
	hn1	1.61	1.2	1.51	1.27	1.4	1.23	1.24	1.31	1.37	1.37	1.5	1.6	1.21	1.28	1.26
	hp1	3.3	3.37	3.02	3.1	3.13	2.79	3.2	2.68	3.09	2.84	3.11	2.98	2.82	2.85	3.06
	b1	1.5	1.34	1.21	1.2	1.29	1.32	1.37	1.42	1.19	1.26	1.44	1.31	1.08	1.3	1.03
Зона на ласерскиот сноп	b2	2.1	2.17	1.5	2.16	2.04	1.39	1.95	1.12	2.05	2.16	1.99	1.69	2.33	1.77	1.21
	hn2	0.72	0.78	0.57	0.6	0.66	0.52	0.86	0.42	0.64	0.88	0.83	0.8	0.47	0.7	-0.11
	hp2	8.56	8.7	9.34	9.07	9.12	9.48	8.99	9.35	9.23	9.5	9.04	9.06	9.51	9.3	9.32
Целосен завар	H	14.28	14.15	14.44	14.24	14.33	14.00	14.40	13.69	14.36	14.51	14.47	14.54	14.14	14.10	13.52

Вредностите од димензионалното мерење на хибридните завари од експерименталниот простор се дадени во Табела 5.1 и истите се измерени преку макрографските снимки користејќи софтверски пакет Levenhuk Toup View. За проверка изведена е споредба на средните вредности измерени со дигитално подвижно мерило (шублер) и забележани се минимални отстапувања до 5 (%) во зоната на електричниот лак, додека во зоната на ласерскиот сноп отстапувањата не се поголеми од 2 (%). Овие отстапувања се занемарливи и произлегуваат од рачното мерење со дигитално подвижно мерило (шублер). Од визуелната контрола може да се утврди дека конструктивен челик во квалитет S355J2 со дебелина од 12 (mm) може хибридно да се завари во еден премин без закосување на рабовите при широчина на грло од 0 (mm).



a) 5-1; b) 6-1; c) 13; d) 14; e) 19

Слика 5.1. Попречен пресек на хибридните завари

Преку визуелната контрола на заварените проби и макрографските снимки од попречните пресеци на хибридните завари се утврди дека сите 15 завари се со прифатлив квалитет според ISO 12932, иако кај заварената проба бр.19 преку макрографската снимка е откриена минимална конкавност од страна на коренот по рабовите на основниот материјал, прикажано на слика 5.1.

Согласно вредностите од димензионалните мерење сите хибридни завари се проверени според ISO 12932 и дополнително извршена е евалуација на класата на квалитет на изведените хибридни завари во поглед на површинските геометриски несовршености. Особено се анализирани следните видови на површински несовршености означени според стандард ISO 6520-1 [123]:

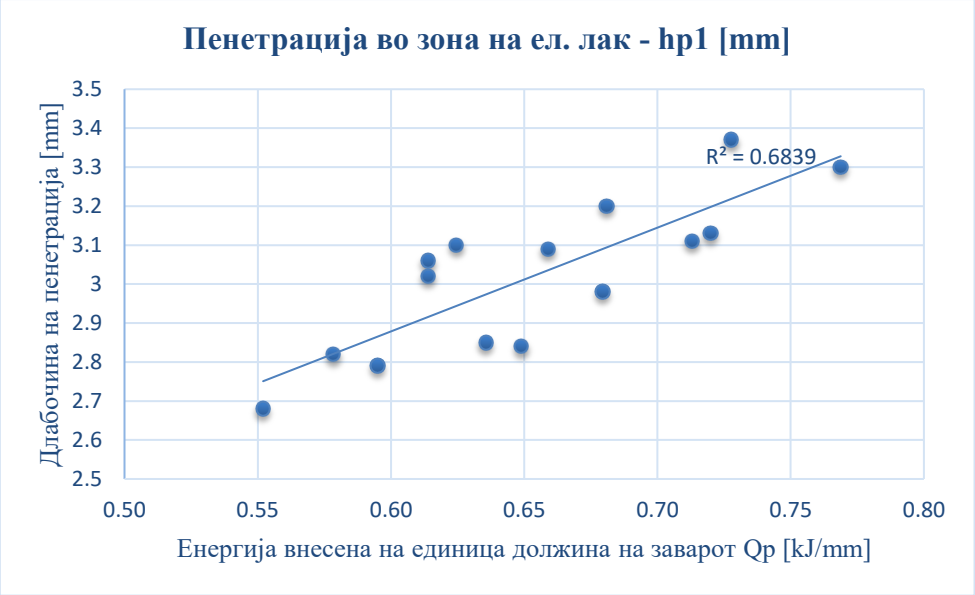
- Привремени поткопувања од страна на лицето – реф. бр. 5012.
- Конкавност од страна на коренот – реф.бр. 515.
- Надвисување од страна на лицето – реф.бр. 502.
- Прокапини од страна на коренот – реф.бр. 504.

Сите површински несовршености се во рамки на највисоката класа на квалитет (Класа B), односно не ги надминуваат граничните вредности. Минимална конкавност од страна на коренот кај хибридниот завар со ознака бр.19 е во рамки на условот за највисок квалитет Класа B за несовршеност со реф.бр. 515, односно 0,11≤0,05t, но максимум 0,50 (mm). Во Табела 5.2 се дадени максималните вредности за површинските геометриски несовршености по класа на квалитет според ISO 12932 и споредбено со измерените вредности сите се означени со жолта боја, односно се во рамки на дозволените димензии за Класа B на квалитет.

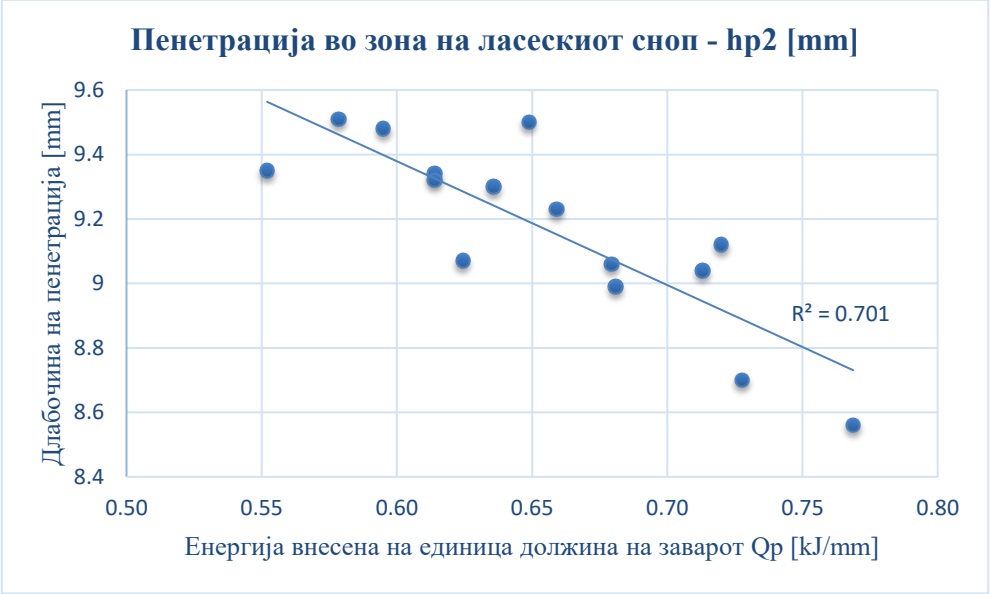
Табела 5.2. Максимални вредности за површински несовршености кај хибридни завари

Класа на квалитет ISO 6520-1	5-1	6-1	7-1	8	9	10	11-1	12-1	13	14	15	16	17	18	19
Реф.бр. 502															
D, hn1≤1 + 0.25*b (mm)	3.10	3.48	2.85	3.13	2.78	2.66	3.33	2.74	3.26	3.32	2.95	2.73	3.26	2.72	3.30
C, hn1≤1 + 0.15*b (mm)	2.26	2.49	2.11	2.28	2.07	1.99	2.40	2.04	2.36	2.39	2.17	2.04	2.36	2.03	2.38
B, hn1≤1 + 0.10*b (mm)	1.84	1.99	1.74	1.85	1.71	1.66	1.93	1.70	1.91	1.93	1.78	1.69	1.90	1.69	1.92
Реф.бр. 504															
D, hn2≤1 + 1.0*b2 (mm)	3.10	3.17	2.50	3.16	3.04	2.39	2.95	2.12	3.05	3.16	2.99	2.69	3.33	2.77	2.21
C, hn2≤1 + 0.6*b2 (mm)	2.26	2.30	1.90	2.30	2.22	1.83	2.17	1.67	2.23	2.30	2.19	2.01	2.40	2.06	1.73
B, hn2≤1 + 0.3*b2 (mm)	1.63	1.65	1.45	1.65	1.61	1.42	1.59	1.34	1.62	1.65	1.60	1.51	1.70	1.53	1.36
Реф.бр. 5012															
D, h≤0.2*t - max 1(mm)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
C, h≤0.1*t - max 0.5(mm)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
B, h≤0.05*t - max 0.5(mm)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Реф.бр. 515															
D, h≤0.2*t - max 2(mm)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
C, h≤0.1*t - max 1(mm)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
B, h≤0.05*t - max 0.5(mm)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

Од макрографските снимки може да се забележи дека сите хибридни завари имаат форма на класична чаша за вино. Во горната зона ширината и висината на лицето на заварот се поголеми во споредба со кореновата страна. Ваквата форма е последица на електричното лак и доведување на додатен материјал во горна зона и се нарекува зона на електричен лак, додека во долната зона или зона на ласерскиот сноп е констатиран потесен завар со паралелни рабни страни. На следните графикони е прикажано влијанието на количеството на внесена енергија на единица должина на заварот врз длабочината на пенетрација во зона на електричниот лак (hp1) и зона на ласерскиот сноп (hp2).



Слика 5.2. Влијание на Qp врз длабочината на пенетрација во зона на електричен лак



Слика 5.3. Влијание на Qp врз длабочината на пенетрација во зона на ласерски сноп

Анализирајќи го графиконот претставен на слика 5.2 може да се согледа дека количеството на внесена енергија на единица должина на заварот (Qp) позитивно влијае врз длабочината на пенетрација во зона на електричниот лак, односно со приближно зголемување на внесената енергија од 0,20 (kJ/mm), пенетрацијата се зголемува за 0,6 (mm). Корелацијата е правопропорционална иако кај одредени точки има расеаност, но се претпоставува тоа е поради останатите параметри кај хибридното заварување.

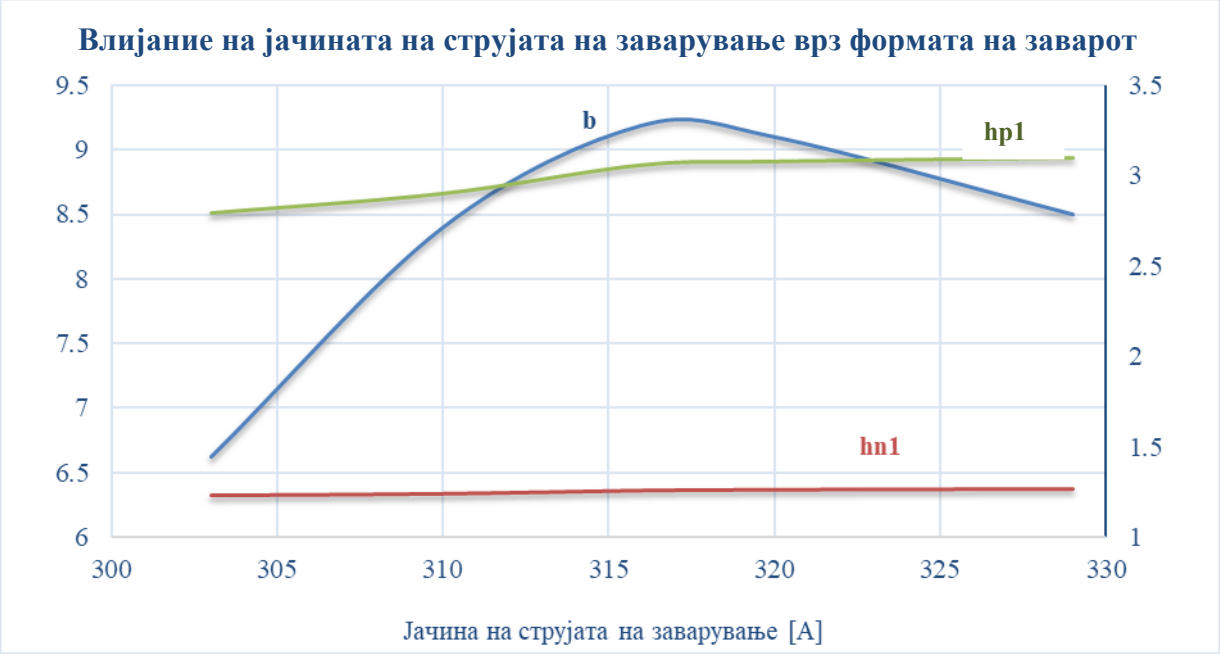
Од друга страна, на графиконот претставен на слика 5.3, количеството на внесена енергија на единица должина на заварот (Qp) има силна негативна корелација со длабочина на пенетрација во зона на ласерскиот сноп (hp2), односно со приближно зголемување на внесената

енергија од 0,20 (kJ/mm), пенетрацијата се намалува за 0,8 (mm). Зголемената количина на енергија се префрла во зона на електричниот лак, што посочува на енергетска прераспределба во хибридниот процес. Ваквата прераспределба е карактеристична кога два извори на енергија дејствуваат во еден заеднички процес. Следствено, за правилна форма на хибридниот завар потребно е да се избалансира количеството на внесена енергија на единица должина од заварот, но сепак иако Qp е значаен параметар, не е единствен во хибридниот процес.

5.1.1. Влијание на јачина на струја на заварување

Земајќи ја во предвид јачината на струјата на заварување (I_z) како единствен параметар кој би влијае врз геометријата на хибридниот завар во зона на електричниот лак, може да се согледа дека со нејзино зголемување се зголемува брзината на топење на жицата. Ова влијае на постепено зголемување на ширината на лицето на заварот до одредено ниво, потоа притисокот од растопената маса е поголем и доведува до зголемена длабочина на пенетрација, а дел од растопениот материјал преминува во зоната на ласерскиот сноп, дадено на слика 5.4. При поголема јачина на струјата на заварување се добива повисоко, но потесно лице на заварот со потенцијална можност за прегорување, односно поткопување на рабовите.

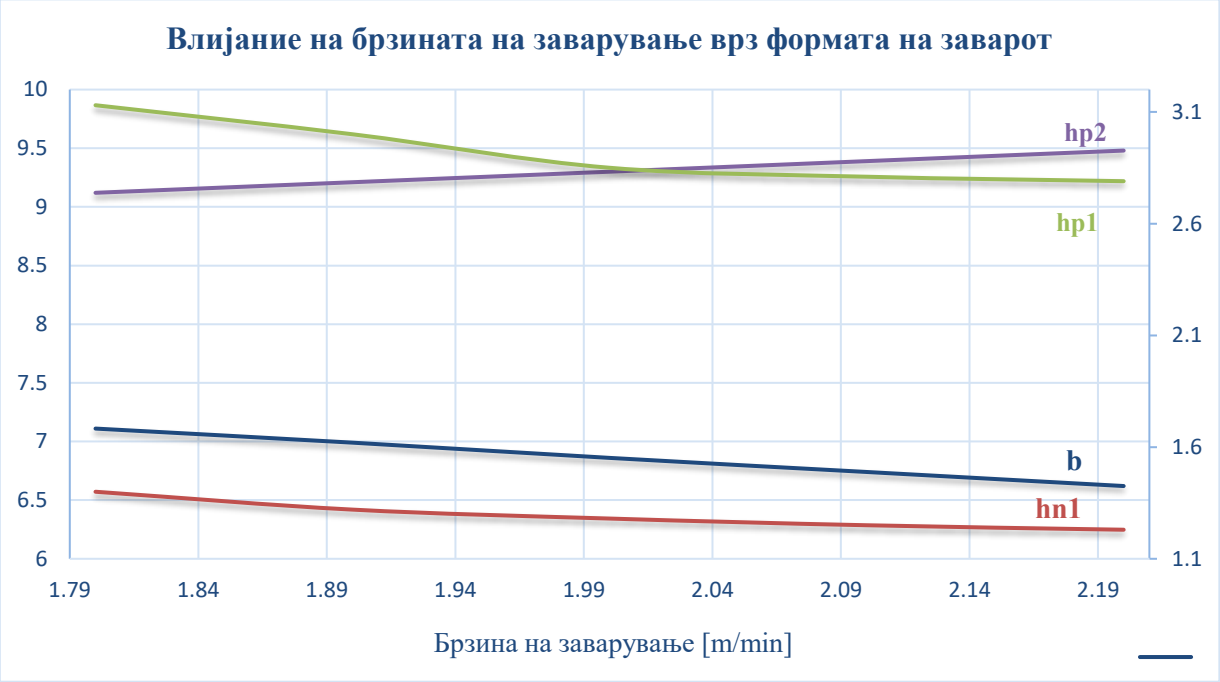
Од друга страна, со зголемување на јачината на струјата постепено се зголемува и длабочината на пенетрација, а тоа генерално се должи на зголеменото количество на внесена енергија на единица должина на заварот и зајакнување на ефикасноста во депонирање на додатен материјал. Надвисувањето на заварот е минимално зависно од јачината на струјата, односно нејзиното зголемување доведува до минорно зголемување на (hn1).



Слика 5.4. Влијание на јачина на струја на заварување врз форма на заварот при P_L = 13 (kW), V_z = 2,2 (m/min)

5.1.2. Влијание на брзина на заварување

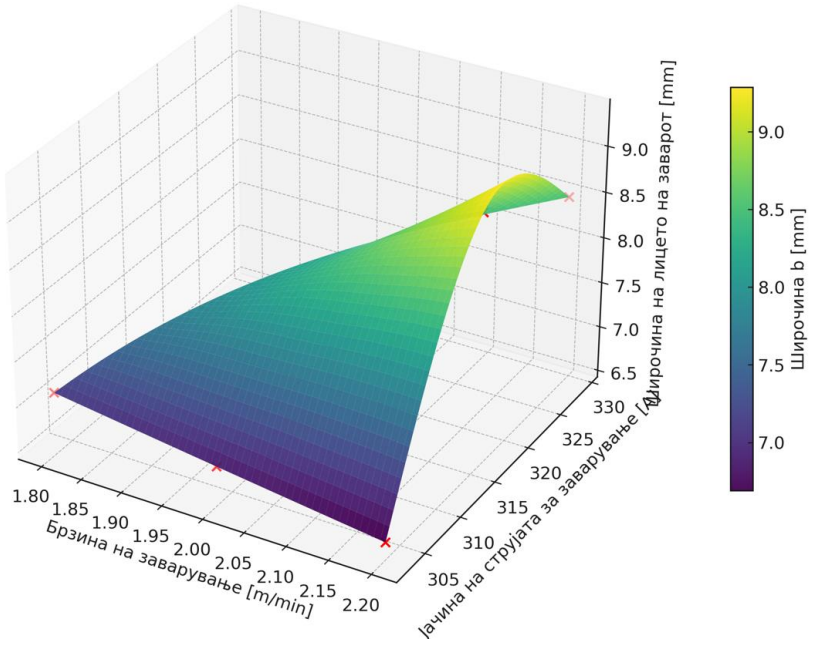
Со зголемување на брзината на заварување се намалува количеството на внесена енергија на единица должина на заварот и на тој начин се намалува волуменот на растопен материјал. Ова доведува до намалување на длабочината на пенетрација во зоната на електричниот лак. Дополнително, зголемената брзина влијае на намалување на широчината на лицето на заварот и намалување на надвисувањето на заварот. Второто влијание е карактеристично за хибридното заварување поради влијание на ласерскиот сноп и е спротивно од конвенционалните постапки на заварување.



Слика 5.5. Влијание на брзина на заварување врз форма на заварот при P_L = 13 (kW), I_z = 303 (A)

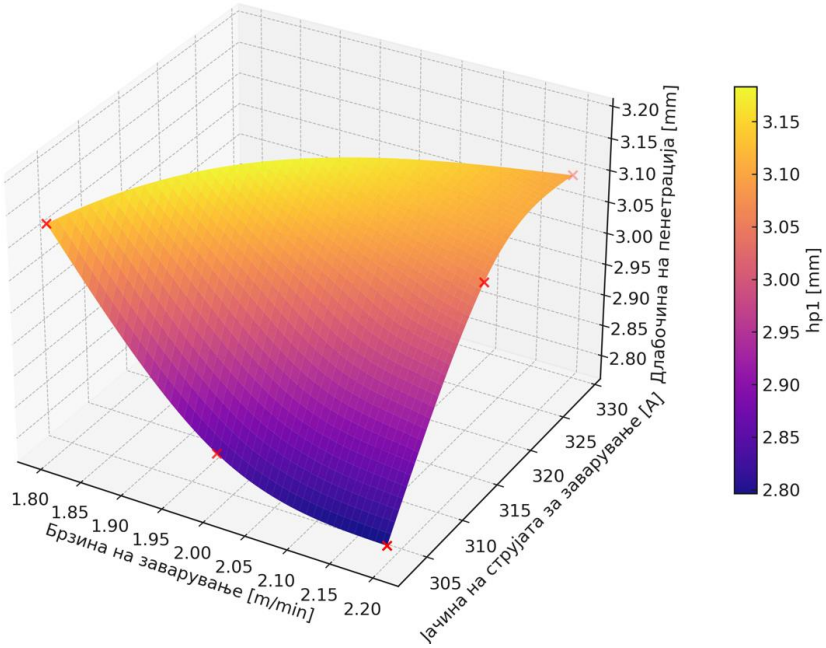
При повисоки брзини на заварување, ласерскиот сноп значително влијае врз длабочината на пенетрација, електричниот лак станува понестабилен и има помалку време за внесување на енергија, додека ласерот ја задржува и зголемува својата доминација во формирање на заварот. Сепак, треба да се внимава до кое ниво може да се зголемува брзината на заварување, поради тоа што над одредено ниво квалитетот на заварот и стабилноста на процесот брзо опаѓаат. Иако големета брзина на заварување е препознатлива карактеристика на хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак, брзиот циклус на загревање и ладење на материјалот може да предизвика металурушки дефекти во самиот завар, линијата на фузија и зоната под влијание на топлина, односно зголемена тврдина и намалена жилавост.

Наредниот графикон (слика 5.6) ја претставува зависноста на широчината на лицето на заварот (b) во интеракција на два клучни параметри: брзина на заварување и јачина на струјата за заварување. Забележливо е позитивна корелација со јачината на струјата, додека ефектот од брзината на заварување е релативно помал, што ја потврдува доминантната улога на јачината на струјата врз геометријата на заварот во зоната на електричниот лак.



Слика 5.6. Интеракција помеѓу брзина на заварување и јачина на струја врз широчина на заварот (b)

Од следниот графикон (слика 5.7) јасно се согледува доминантната улога на брзината на заварување врз длабочината на пенетрација во зона на електричниот лак. Поголема брзина на заварување доведува до намалена длабочина на пенетрација, поради тоа што директно влијае на намалување на количеството внесена енергија на единица должина на заварот, а од друга страна поголеми брзини доведуваат до нестабилност на електричниот лак. Влијанието на јачината на струјата за заварување е секундарно и ограничено, но сепак позитивно се манифестира врз длабочината на пенетрација.



Слика 5.7. Интеракција помеѓу брзина на заварување и јачина на струја врз длабочина на пенетрација во зона на електричен лак

Моќноста на ласерскиот сноп е главен параметар од кој зависи длабочината на пенетрација и широчината на заварот во зона на ласерскиот сноп. Длабочината на пенетрација кај целокупниот хибриден завар првенствено е зависна од моќноста на ласерот. Со нејзино зголемување се создава насочена и тесна површина на топење, а висината на проварот се намалува. Длабочината на пенетрација незначително зависи од јачината на струјата на заварување се додека има доволна моќност од ласерскиот сноп [84]. За примена во практиката, моќноста на ласерот треба да биде еднаква со дебелината на материјалот кој се заварува со цел да се постигне целосна пенетрација при хибридно заварување во еден премин без закосување на рабовите [7, 84]. Во конкретниот случај моќноста на ласерот потребно е да биде 12 (kW) за целосна пенетрација, што се потврдува со експерименталното истражување.

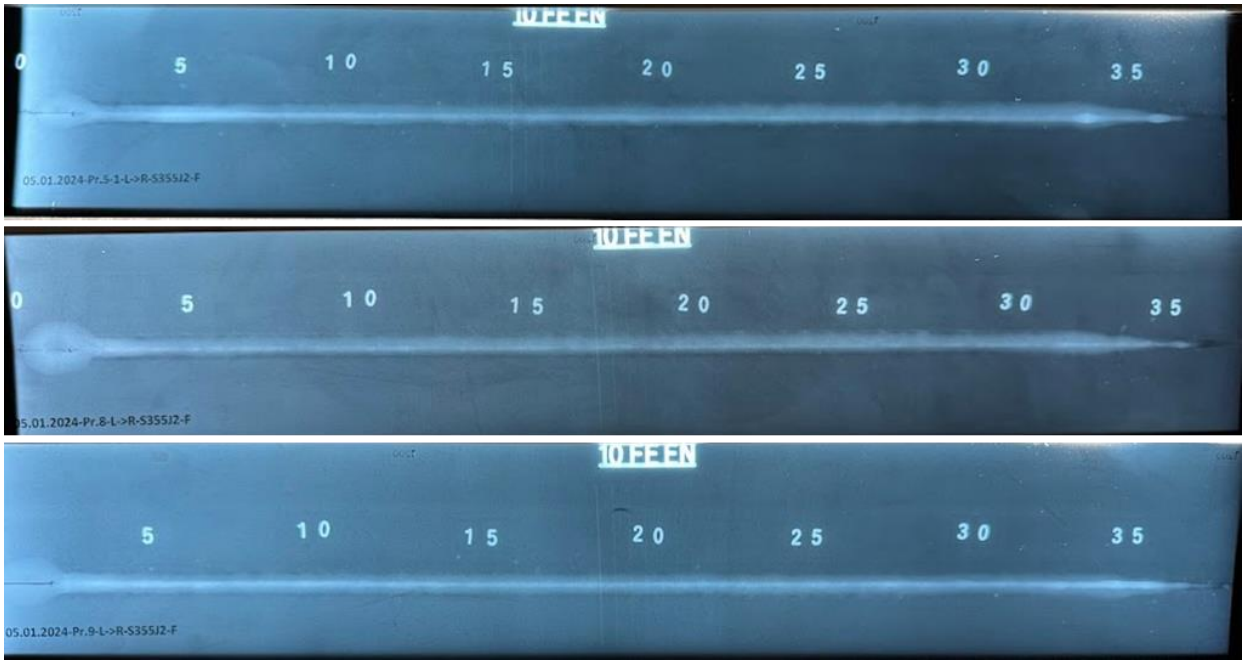
5.2. Резултати и анализа на податоци од радиографска контрола

Преглед и анализа на радиографските снимки е извршена со користење на негатоскопи или илуминатори. На слика 5.8 и слика 5.9 се прикажани само 6 радиограми кои се покарактеристични за експерименталното истражување и дефектите кои се констатирани кај некој од нив. За да може да се оцени хибридно заварената проба, настанатите дефекти од процесот на заварување се класифицирани според ISO 6520-1, додека квалитетот на хибридниот завар се определува според ISO 12932 и кај сите хибридни завари е констатирана највисоката Класа В на квалитет.

Класа В на квалитет претставува одлично изведен завар. Во оваа група спаѓаат завари чии радиографски снимки (радиограми) не покажуваат неприфатливи грешки. Се дозволува на одделни места да има минимални гасни пори, привремени поткопувања, мала конкавност од страна на коренот и сл. Ваквите видови на дефекти се од локално значење и со мали димензии, така што не предизвикуваат намалување на носивоста на самиот завар и не претставуаат потенцијално место за развој на макро пукнатина. Коренот на заварот мора да има доволна пенетрација, лицето да е рамномерно глатко, а на радиографската снимка да не се појават темни површини во лицето на заварот (недоволно исполнување и сл.).

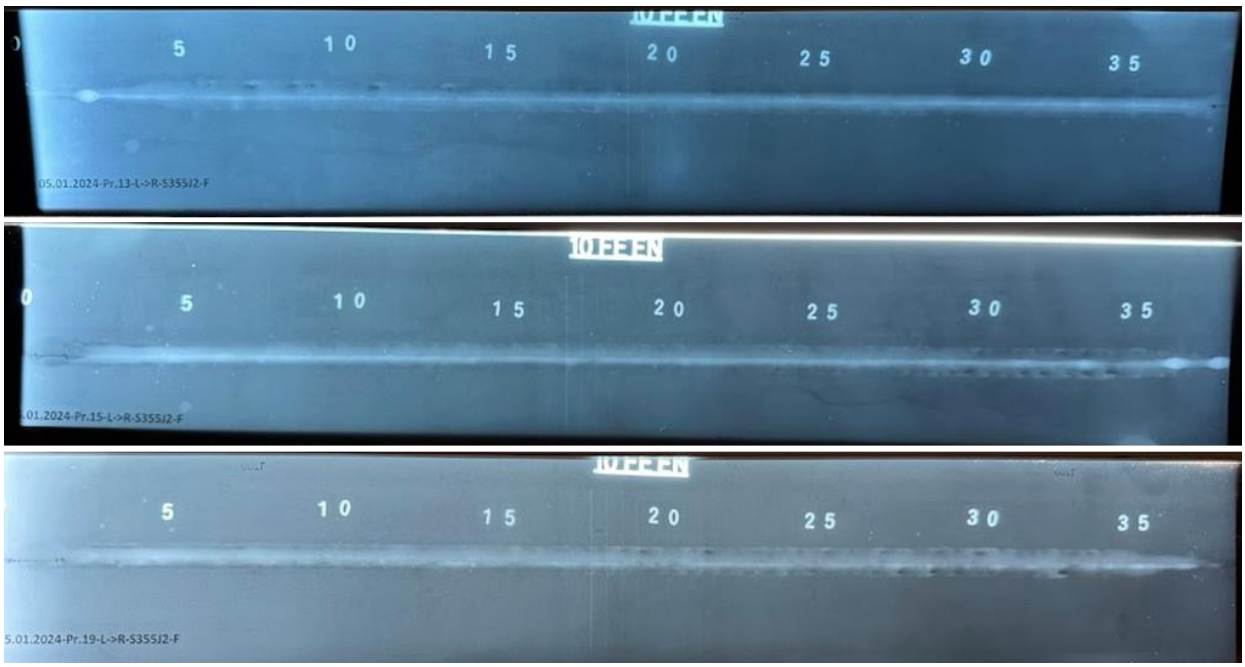
Табела 5.3. Резултати од радиографска контрола на хибридни завари

Ознака	Димензии (mm)	Дебелина на материал (mm)	Бр. на жица	Број и ознака на радиограм	Дефекти во заварот EN 6520-1	Технички опис	Класа на квалитет ISO 12932	Прифатливо	Не-прифатливо
5-1	300x400	12	15	5-1 L-R	/	/	B	Прифатливо	
6-1	300x400	12	15	6-1 L-R	/	/	B	Прифатливо	
7-1	300x400	12	15	7 L-R	5012	Поткопувања на рабовите - лице	B	Прифатливо	
8	300x400	12	15	8 L-R	/	/	B	Прифатливо	
9	300x400	12	15	9 L-R	/	/	B	Прифатливо	
10	300x400	12	15	10 L-R	/	/	B	Прифатливо	
11-1	300x400	12	15	11-1 L-R	/	/	B	Прифатливо	
12-1	300x400	12	15	12-1 L-R	5012	Поткопувања на рабовите - лице	B	Прифатливо	
13	300x400	12	15	13 L-R	5012	Поткопувања на рабовите - лице	B	Прифатливо	
14	300x400	12	15	14 L-R	5012	Поткопувања на рабовите - лице	B	Прифатливо	
15	300x400	12	15	15 L-R	5012	Поткопувања на рабовите - лице	B	Прифатливо	
16	300x400	12	15	16 L-R	/	/	B	Прифатливо	
17	300x400	12	15	17 L-R	5012	Поткопувања на рабовите - лице	B	Прифатливо	
18	300x400	12	15	18 L-R	/	/	B	Прифатливо	
19	300x400	12	15	19 L-R	5012	Поткопувања на рабовите - лице	B	Прифатливо	
					515	Конкавност - корен	B	Прифатливо	



Слика 5.8. Радиографски снимки од хибрдини завари: a) 5-1; b) 8; c) 9

Од радиографските снимки прикажани на слика 5.8 може да се заклучи дека нема појава на дефекти во хибридниот завар. Почетокот и крајот од заварот не се предмет на анализа поради тоа што се отфрлаат и не подлежат на механички испитувања. Во Табела 5.3 се дадени резултати од радиографската контрола од вкупно 15 хибридни завари во експерименталното истражување, од кои 8 се изведени без појава на дефект. Останатите 7 хибридни завари поседуваат два типа на дефекти, привремени поткопувања од страна на лицето и конкавност од страна на коренот, прикажани на слика 5.9.



Слика 5.9. Радиографски снимки од хибрдини завари: a) 13; b) 15; c) 19

Поткопувања од страна на лицето се појавуваат поради голема јачина на струјата на заварување. Динамика на растопената маса е повеќе насочена спрема длабочината на пенетрација, а рабовите на основниот материјал се растопуваат подлабоко. Исто така е докажно со количеството на внесена енергија на единица должина на заварот, односно кога погонската енергија се зголемува преку зголемување на јачината на струјата за заварување се зголемува длабочината на пенетрација во зоната на електричниот лак.

Генерално, најголемата вредност на несовршеност е 0,30 (mm) со реф.бр.5012, а за реф.бр.515 е 0,20 (mm). Според, ISO 12932 Класа B овие вредности се прифатливи и хибридните завари се оценети со највисока класа на квалитет.

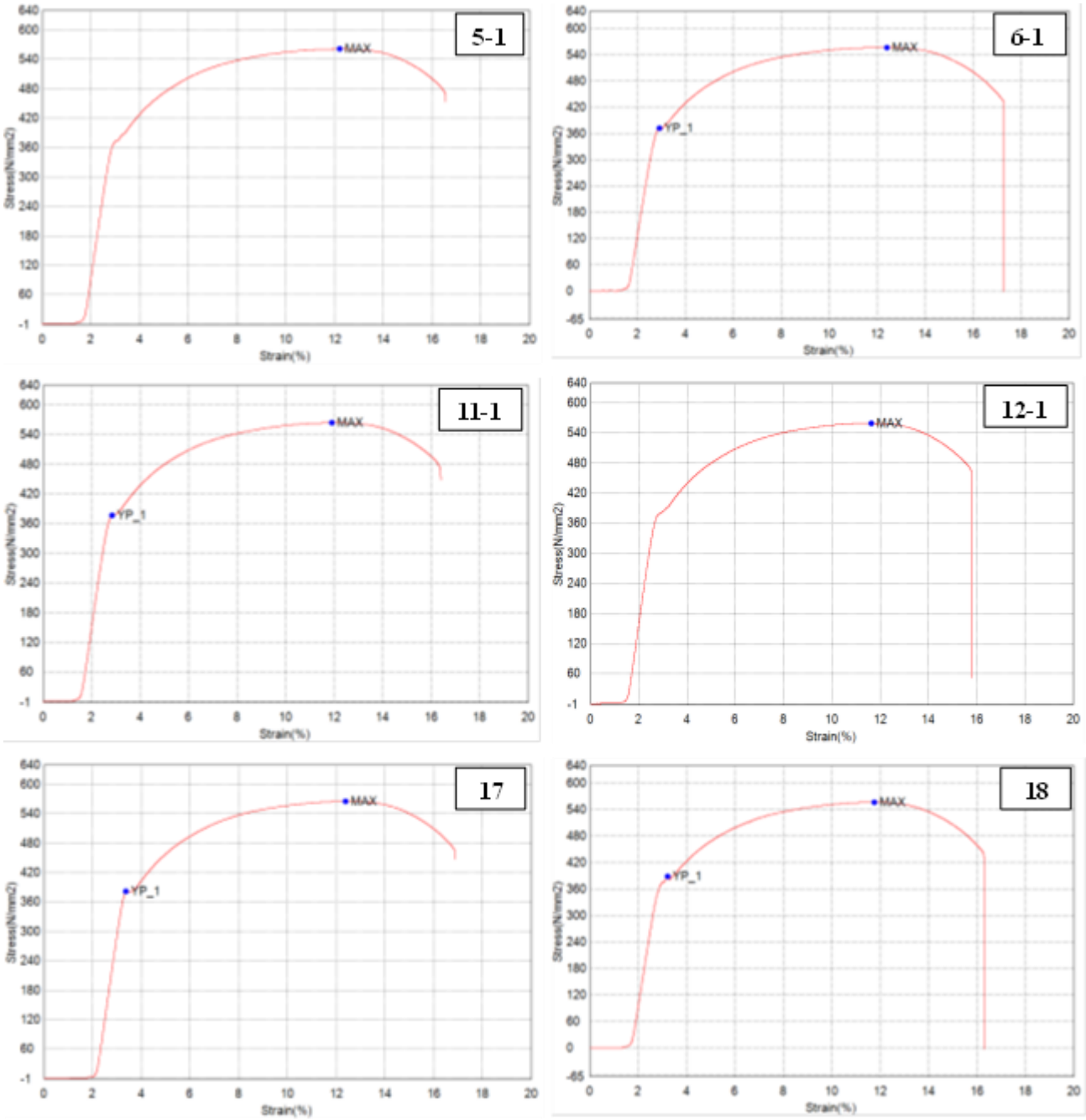
5.3. Резултати и анализа на податоци од испитување на затегнување

Испитување на затегнувачката јакост на заварените епрувети е изведено со цел да се определат механичките карактеристики на хибридниот завар и нивната усогласеност со пропишаните стандарди. Испитувањето е спроведено во согласност со ISO 4136, при контролирани лабораториски услови и дополнително се испитувани нестандардни епрувети со симетричен правоаголен жлеб во зоната на заварот. Во рамки на испитувањето определени се вредностите на: граница на течење (R_{eH}), затегнувачка јакост (R_m) и единечно издолжување (ε). Дополнително е анализирана локацијата на прекин (кинење) со цел да се определи квалитетот на хибридните завари.

Резултатите од испитувањето на затегнувачката јакост на стандардните епрувети се дадени во Табела 5.4, а дел од дијаграмите „напон – единечно издолжување“ се прикажани на слика 5.10. Податоците се превземени од дијаграмите и техничкиот извештај за секоја епрувета посебно.

Табела 5.4. Резултати од испитување на затегнување на стандардни епрувети

Ознака	Дебелина на епрувета (mm)	Широчина на епрувета (mm)	Граница на течење на материјалот ReH (N/mm^2)	Единечно издолжување при ReH (%)	Максимална затегнувачка јакост Rm (N/mm^2)	Единечно издолжување при Rm (%)	Единечно издолжување ε (%)
5-1	12.40	25.00	370.05	3.20	560.79	12.20	16.50
6-1	12.40	25.00	371.60	2.92	556.25	12.41	17.10
7-1	12.40	25.00	390.49	3.05	564.39	12.48	17.02
8	12.40	25.00	377.60	3.30	559.49	12.60	18.09
9	12.40	25.00	390.40	3.40	556.38	11.15	16.00
10	12.40	25.00	384.94	3.11	559.82	12.40	16.97
11-1	12.40	25.00	376.20	2.85	563.54	11.91	16.30
12-1	12.40	25.00	380.01	2.98	559.08	11.65	15.86
13	12.40	25.00	381.31	3.46	565.77	12.82	17.10
14	12.40	25.00	385.20	3.54	559.19	12.71	18.00
15	12.40	25.00	378.88	2.88	563.32	12.10	17.70
16	12.40	25.00	379.41	3.22	557.30	11.86	16.87
17	12.40	25.00	381.91	3.38	565.06	12.40	16.90
18	12.40	25.00	387.79	3.22	556.38	11.75	16.23
19	12.40	25.00	374.55	1.65	556.70	10.24	15.06

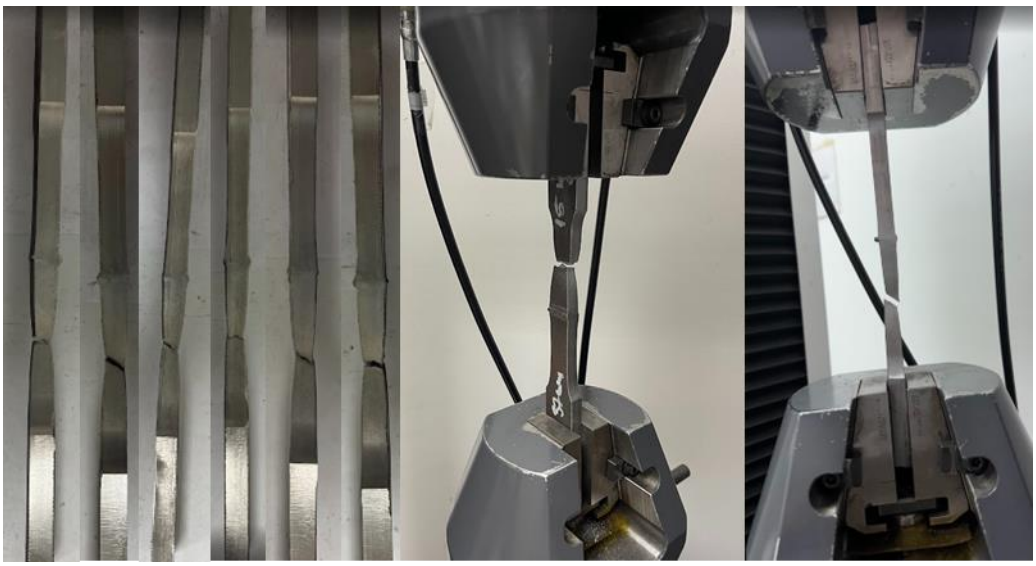


Слика 5.10. Дијаграми „напон – единечно издолжување“ на стандардни епрувети од хибридни завари: a) 5-1; b) 6-1; c) 11-1; d) 12-1; e) 17; f) 18

Врз основа на резултатите од испитувањето на затегнување на стандардни епрувети може да се констатира следното:

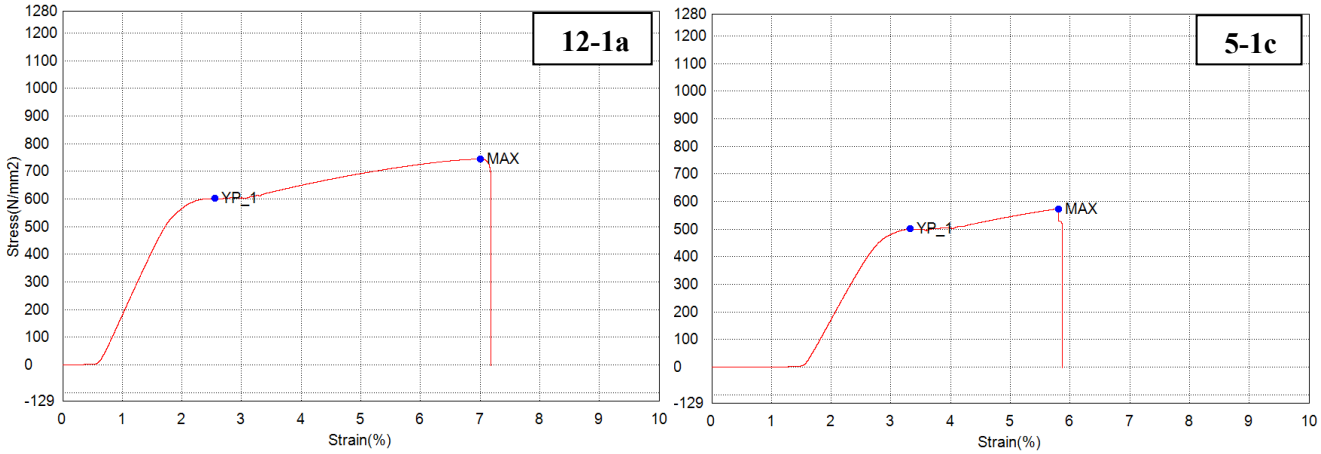
- Кај сите 15 стандардни епрувети до прекин (кинење) на епруветата е дојдено во основниот материјал.
- Дијаграмите покажуваат јасен еластичен дел, изразена граница на течење и постепено зголемување на максималната затегнувачка јакост, односно укажуваат на стандардно пластично деформирање под дејство на аксијална сила.

- Единечното издолжување кај сите примероци е релативно големо и се движи во интервал од 15-18 (%) што е показател за одлична пластичност и жилавост.
- Сите примероци покажуваат хомогеност, нема појава на предвремен прекин (кршење) или ниска пластичност во зоната под влијание на топлина и во металот на заварот.
- Хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак на конструктивен челик со дебелина од 12 (mm) во еден премин без закосување на рабовите овозможува добивање на завар со поголема затегнувачка јакост од основниот материјал S355J2.



Слика 5.11. Стандардни епрувети за испитување на затегнувачка јакост на хибридни завари по процесот на испитување

Резултатите од испитување на затегнувачката јакост на нестандардните епрувети се дадени во Табела 5.5, а дијаграмите „напон – единечно издолжување“ од минималните и максималните вредности на параметрите од експерименталниот простор се прикажани на слика 5.12. Податоците се преземени од дијаграмите и техничкиот извештај за секоја епрувета посебно.



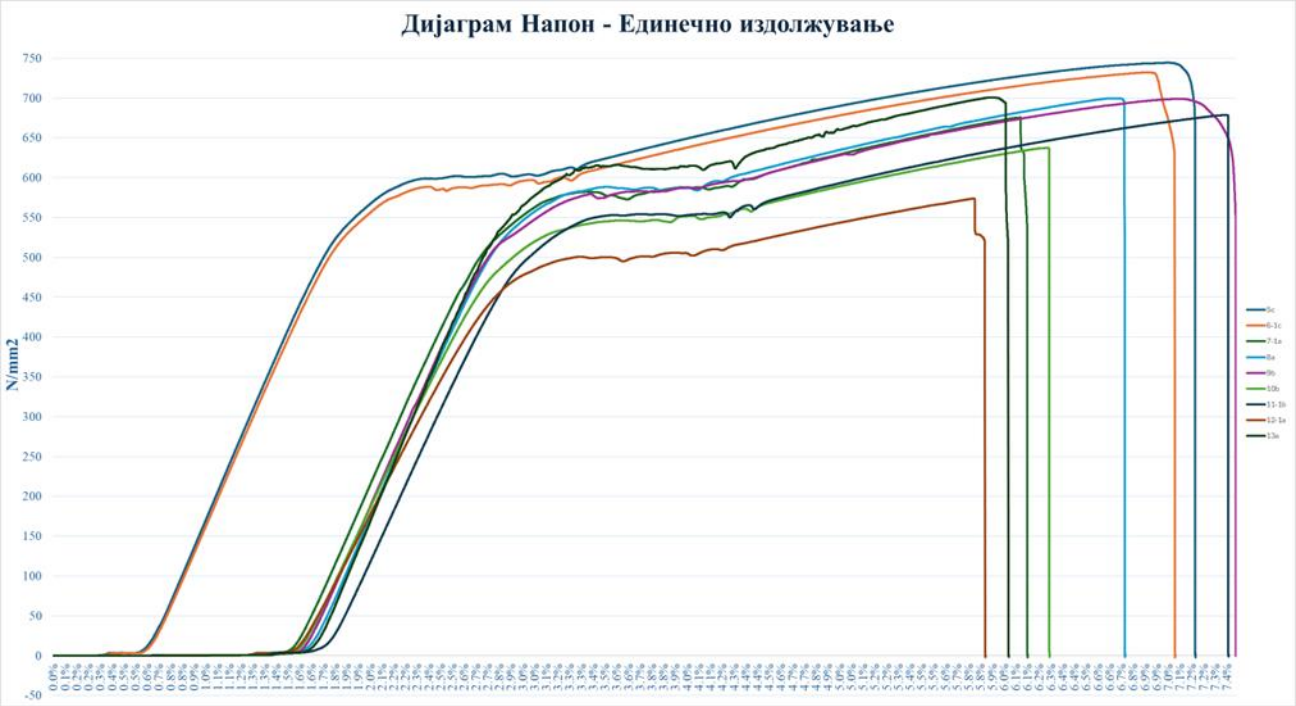
Слика 5.12. Дијаграми „напон – единечно издолжување“ на нестандардни епрувети од хибридни завари: а) 12-1a; b) 5-1c

Табела 5.5. Резултати од испитување на затегнување на нестандардни епрувети

Ознака	Површина на попречен пресек (mm^2)	Граница на течење на материјалот ReH (N/mm^2)	Единечно издолжување при ReH (%)	Максимална затегнувачка јакост Rm (N/mm^2)	Единечно издолжување при Rm (%)	Единечно издолжување ε (%)
5-1a	192.20	597.20	2.43	735.88	6.81	6.82
5-1b	195.30	587.13	2.39	729.51	6.99	7.30
5-1c	190.96	602.17	2.56	744.33	7.01	7.20
6_1a	195.00	595.31	2.72	705.80	5.81	6.10
6_1b	193.44	593.13	3.45	718.72	7.12	7.13
6_1c	195.00	588.73	2.38	732.15	6.89	7.10
7_1a	209.04	582.26	3.38	675.58	6.09	6.20
7_1b	223.04	541.64	3.36	671.01	7.49	7.50
7_1c	224.00	530.10	3.51	661.20	7.77	7.78
8a	195.92	588.44	3.50	699.51	6.71	6.72
8b	189.42	608.34	3.55	703.20	6.15	6.20
8c	192.20	595.58	3.38	722.96	7.25	7.25
9a	196.00	604.25	3.25	739.85	7.00	7.10
9b	207.32	579.48	3.39	699.15	7.08	7.40
9c	210.16	570.27	3.35	704.77	7.56	7.70
10a	220.80	544.57	3.43	628.27	5.93	6.00
10b	219.62	546.28	3.57	637.33	6.26	6.26
10c	215.84	549.15	3.39	650.41	6.59	6.60
11_1a	214.32	556.12	3.81	688.48	7.81	7.82
11_1b	212.91	554.19	3.70	678.82	7.39	7.40
11_1c	209.04	550.18	3.61	675.41	7.21	7.22
12_1a	239.70	500.65	3.33	574.01	5.80	5.90
12_1b	223.56	537.36	3.64	609.62	5.72	5.73
12_1c	242.20	496.47	3.34	613.88	7.43	7.43
13a	189.72	615.70	3.43	700.84	5.91	6.00
13b	189.72	611.69	3.52	690.96	5.72	5.80
13c	190.96	610.07	3.40	707.47	6.16	6.40
14a	224.36	532.81	3.53	664.10	7.78	7.78
14b	215.84	557.35	3.45	694.51	8.13	8.13
14c	223.08	539.27	3.55	662.97	7.60	7.60
15a	192.20	605.11	3.53	751.34	8.05	8.20
15b	195.30	597.16	3.44	702.15	6.53	6.60
15c	196.85	598.12	3.46	718.20	7.20	7.23
16a	198.40	576.58	2.31	718.40	6.82	7.00
16b	198.75	579.48	2.30	730.64	7.53	7.70
16c	193.98	588.97	2.25	739.44	7.16	7.20
17a	193.75	613.52	2.64	678.51	4.75	4.90
17b	190.96	621.75	2.67	708.16	5.25	5.30
17c	195.00	609.68	2.63	681.93	4.94	5.00
18a	195.30	595.27	2.55	724.84	6.60	6.70
18b	193.75	601.26	2.40	721.73	6.22	6.30
18c	199.08	586.75	2.39	686.96	5.72	5.73
19a	188.48	614.82	3.55	680.98	5.57	5.80
19b	190.96	604.86	3.40	702.71	6.29	6.50
19c	195.92	587.40	3.39	719.62	7.51	7.60

Врз основа на дијаграмите од слика 5.12 и слика 5.13 се гледа дека при максимална моќност на ласерскиот сноп и јачина на струјата за заварување, а минимална брзина на заварување резултира во висока затегнувачка јакост на хибридниот завар и обратно.

Дополително, определена е обратнопропорционална зависност помеѓу единечното издолжување на хибридните завари и брзината на заварување. Намалена брзина на заварување придонесува за поголемо единечно издолжување и обратно.



Слика 5.13. Дијаграми „напон – единечно издолжување“ на нестандардни епрувети од хибридни завари од ортогоналниот метод: a) 5-1c; b)6-1c; c)7-1a; d)8a; e)9b; f)10b; g)11-1b; h)12-1a; i)13a

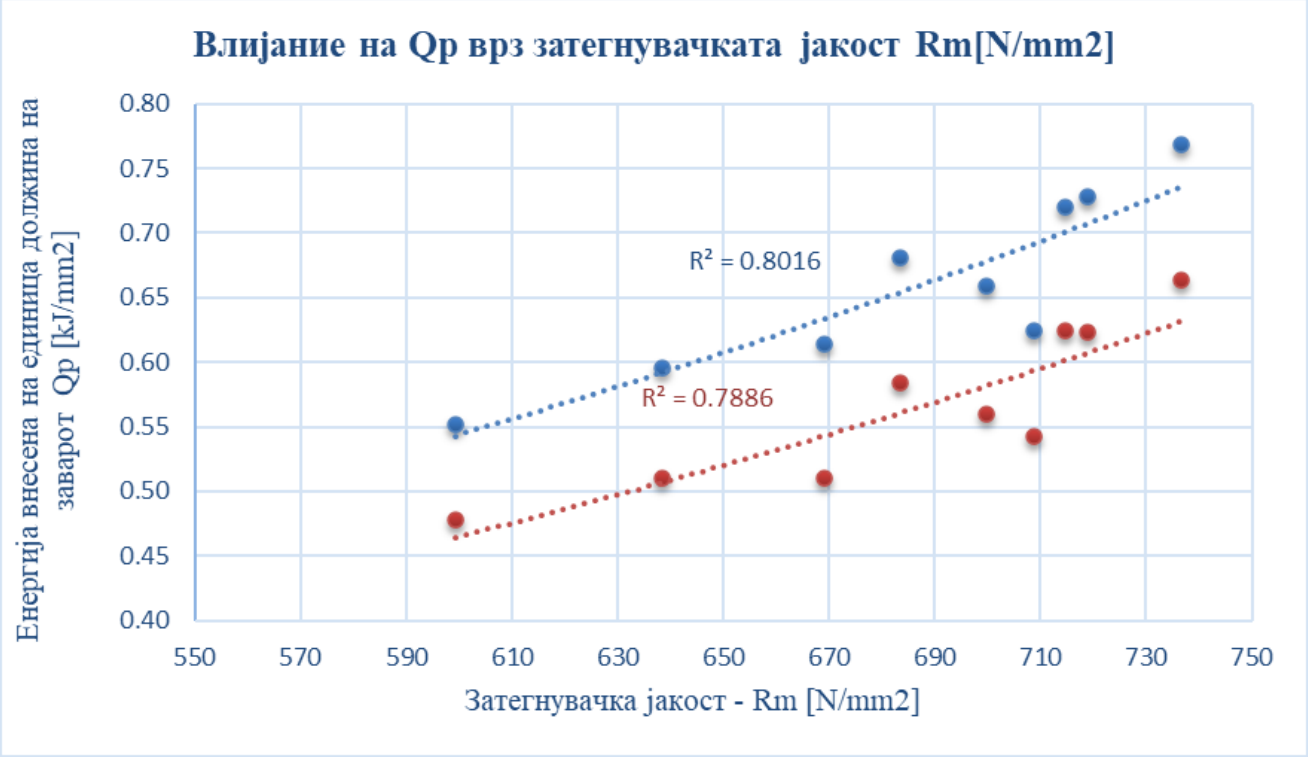
Засновано на добиените резултати, извршена е анализа на влијанието од количината на внесена енергија по единица должина на заварот врз затегнувачката јакост. При анализата се користени средните вредности на затегнувачка јакост од испитуваните епрувети на хибридните завари изведени согласно ортогоналниот метод, прикажани на слика 5.14.

Според резултатите од испитување на затегнување на нестандардни епрувети може да се констатира следното:

- Затегнувачката јакост кај сите хибридни завари е поголема од јакоста на основниот материјал, односно најниската измерена вредност на затегнувачка јакост изнесува 574 (N/mm^2), што претставува зголемување од 9,33 (%) во однос на затегнувачката јакост на основниот материјал.
- Правопропорционална зависност помеѓу единечното издолжување и количината на внесена енергија по единица должина на заварот.
- Единечното издолжување кај испитаните хибридни завари се движи во интервал од 4,75 (%) до 8,05 (%) во зависност од количината на внесена енергија по единица должина на заварот. Овие вредности се значително пониски во однос на основниот материјал, кој има издолжување од 29,8 (%). Ова укажува, иако хибридните завари обезбедуваат повисока затегнувачка јакост, нивната пластичност е намалена поради

промените во микроструктурата на металот на заварот и зоната под влијание од топлина.

- Утврдена е обратнопропорционална зависност помеѓу единечното издолжување и брзината на заварување. Сепак, овој негативен ефект е значително помалку изразен при поголема јачина на струјата за заварување. Најниско единечно издолжување е добиено при комбинација на висока брзина на заварување со најмала јачина на струјата за заварување.
- Кај сите добиени дијаграми јасно се идентификува еластичниот дел, границата на течење и максималната затегнувачка јакост, по што следува брз премин во зоната на прекин (кинење), односно се регистрира крт лом (прекин). Ова укажува големите брзини на заварување доведуваат до голема брзина на ладење во зоната на заварот и појава на покрта микроструктура која што се карактеризира со намалена пластичност.
- Површината на прекин посочува на релативно крт завар, која започнува по линијата на фузија во зоната на електричниот лак и продолжува во металот на заварот во зоната на ласерскиот сноп, прикажано на слика 5.15.



Слика 5.14. Влијание на Qp врз максимална затегнувачка јакост на хибридни завари

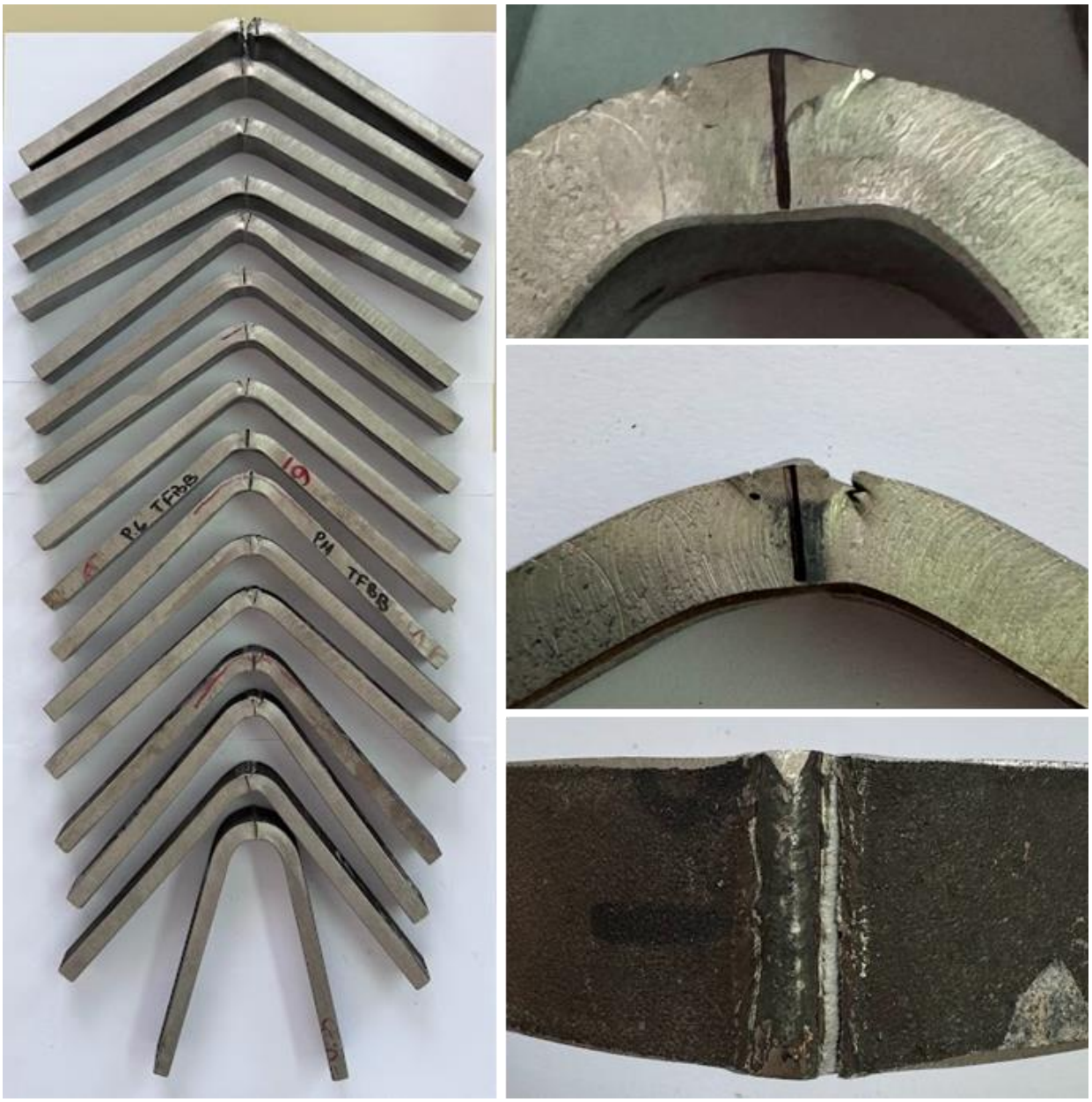
Слика 5.15. Површини на прекин кај нестандардни епрувети при испитување на затегнување

Анализирајќи го графиконот даден на слика 5.14 може да се заклучи дека со зголемување на внесената енергија по единица должина на заварот (Qp) се зголемува затегнувачката јакост (R_m), при што постои јасна позитивна линеарна зависност помеѓу двете големини. Поголемите вредности на Qp резултираат со подлабока пенетрација, особено во зоната на електричниот лак, што обезбедува порамномерно топење и намалени брзини на ладење, а со тоа и похомогена микроструктура и намалена концентрација на напони.

5.4. Резултати и анализа на податоци од испитување на свиткување

Испитувањето на свиткување на епрувети од заварените проби е основно испитување за проверка на квалитетот и интегритетот на хибридниот завар. Со ова испитување се утврдува отпорноста на заварот и зоната под влијание на топлина на пластични деформации, односно се определува деформационата способност и технолошката карактеристика на заварот. Испитувањето е изведено согласно ISO 5173 на два типа епрувети. Една е за испитување од страна на коренот со ознака (RBB), а другата е од страна на лицето на заварот со ознака (FBB).

Резултатите од испитувањето на свиткување на двата типа се дадени во Табела 5.6, а состојбата на епруветите по процесот на испитување е прикажана на слика 5.16 и слика 5.17.



Слика 5.16. Епрувети за испитување на свиткување од страна на лицето на заварот (FBB)

Резултатите од испитување на свиткување посочуваат дека хибридните завари имаат пониска отпорност на свиткување од страна на лицето на заварот, додека кореновата страна демонстрира одлична деформабилност. Анализата на местата на иницијалните пукнатини посочуваат дека тие се јавуваат во зона на електричниот лак, односно долж линијата на фузија, прикажано на слика 5.16.

Табела 5.6. Резултати од испитување на свиткување (агол на свиткување)

Ознака на завар	Ознака на епрувета	Агол на свиткување	Резултати
5-1	TFBB	100◦	прифатливо - ниска класа
5-1	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
6-1	TFBB	100◦	прифатливо - ниска класа
6-1	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
7-1	TFBB	80◦	неприфатливо
7-1	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
8	TFBB	90◦	прифатливо - ниска класа
8	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
9	TFBB	110◦	прифатливо
9	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
10	TFBB	100◦	прифатливо - ниска класа
10	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
11-1	TFBB	110◦	прифатливо
11-1	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
12-1	TFBB	100◦	прифатливо - ниска класа
12-1	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
13	TFBB	120◦	прифатливо
13	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
14	TFBB	120◦	прифатливо
14	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
15	TFBB	130◦	прифатливо
15	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
16	TFBB	100◦	прифатливо - ниска класа
16	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
17	TFBB	100◦	прифатливо - ниска класа
17	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
18	TFBB	110◦	прифатливо
18	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа
19	TFBB	120◦	прифатливо
19	TRBB	160-170◦	прифатливо - висока класа

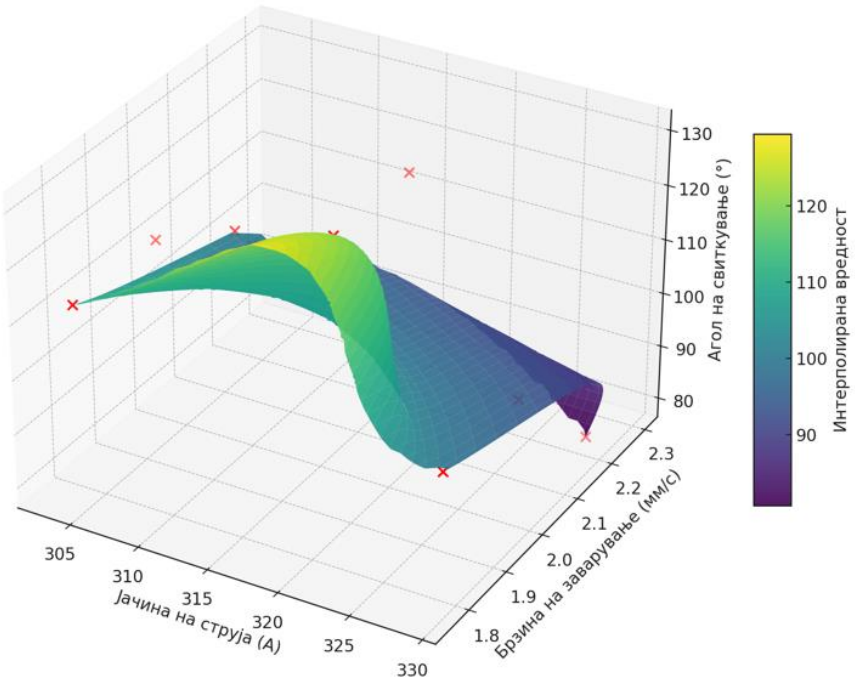
Од горната табела може да се согледа дека кај кореновата страна, аголот на свиткување е во рамки од 160◦ до 170◦ за сите хибридни завари од експерименталното истражување, додека максималниот агол на свиткување постигнат од страна на лицето на заварот изнесува 130◦, а заварената проба бр.7-1 се карактеризира со неприфатлива деформабилност, односно е појавена пукнатина при агол од 80◦ Врз основа на ова, евидентно е дека топлината внесена од страна на електричниот лак преминува во зона на ласерскиот сноп, резултирајќи во зголемена брзина на ладење во зона под влијание на топлина и предизвикувајќи послаба фузија во горната зона. Големите брзини на ладење во зона на заварот предизвикуваат појава на покрта микроструктура која се карактеризира со намалена пластичност. Поради овој ефект, во практиката се препорачува да се изведе минимално закосување на рабовите во горна зона за да се предизвика подобра динамика на растопената маса и пренасочување на вишокот растопен материјал кон задниот дел на заварувачкото купатило и подобро растопување на рабовите во горна зона [7].

Слика 5.17. Епрувети за испитување на свиткување од страна на коренот на заварот (RBB)

Врз основа на резултатите од визуелната контрола, зона на електричниот лак е во зависност од јачина на струјата за заварување и брзината на заварување. Поради тоа извршена е анализа на влијанието на овие два параметри врз деформационата способност на заварот, односно врз аголот на свиткување од страна на лицето на заварот, прикажано на слика 5.18.

Од добиениот график може да се согледа дека степенот на деформабилност кај лицето на заварот не зависи од вкупното количество на внесена енергија по единица должина на заварот, туку само од енергијата обезбедена од електричниот лак. Генерално, со зголемување на јачина на струјата на заварување се зголемува деформабилноста во зона на електричниот лак до одредено нивоа, а потоа почнува да се намалува. Одговор на овој феномен може да се пронајде во појавените привремени поткопување на рабовите кои се создаваат поради високата јачина на струјата за заварување, а овие поткопување претставуваат иницијално место за развој на пукнатина при оптеретување на затегнување. Од друга страна, големата брзина на заварување доведува до намалено количество на внесена енергија на единица должина на

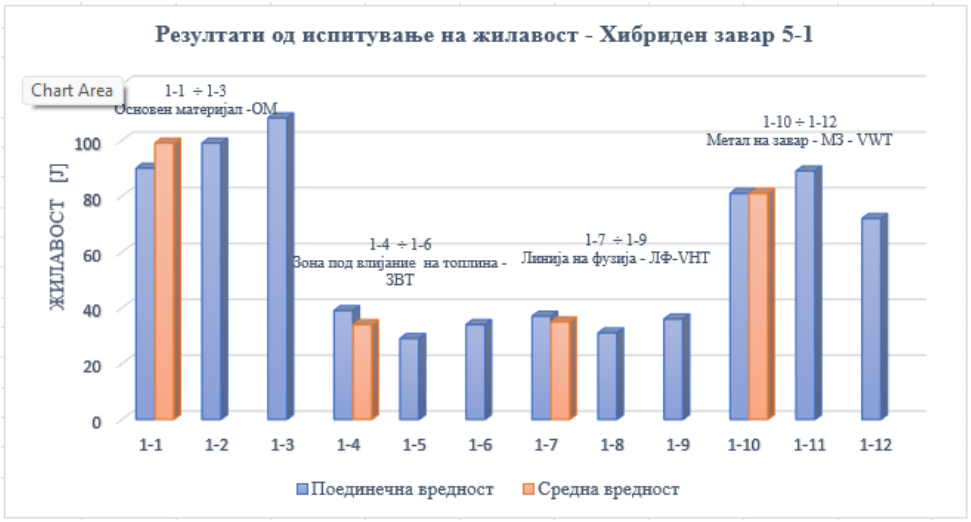
заварот и намалување на волуменот на растопената маса. На тој начин има послабо растопување на рабовите на основниот материјал и појава на металуршки дефекти поради брзиот циклус на загревање и ладење. Следствено, за добивање на хибриден завар со одлична деформабилност потребни се помали брзини на заварување и средни вредности на јачината на струјата за заварување.



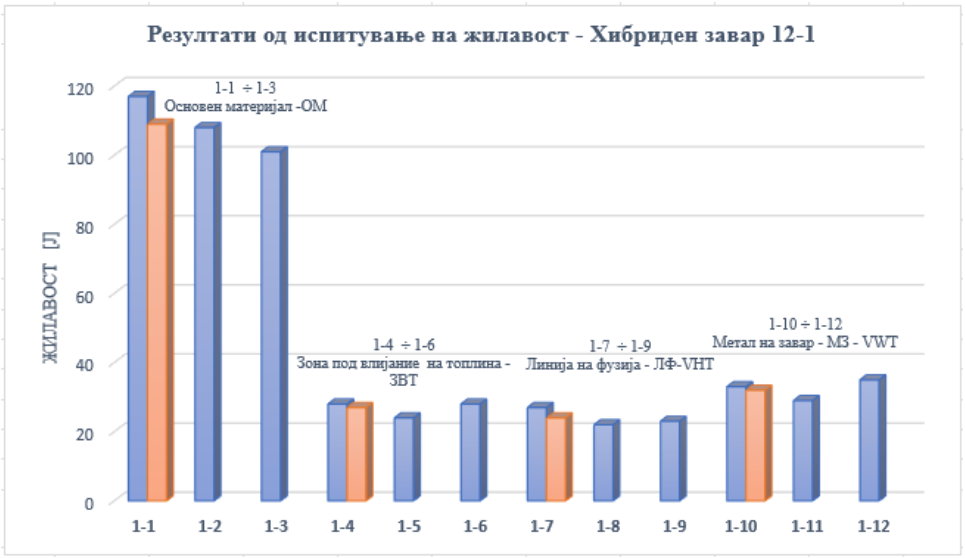
Слика 5.18. Интеракција помеѓу јачина на струја на заварување и брзина на заварување врз отпорноста на свиткување од страна на лицето на заварот

5.5. Резултати и анализа на податоци од испитување на жилавост

Резултатите од испитување на жилавост и нивната анализа имаат за цел да ја одредат вкупната енергија која може да ја апсорбира хибридниот завар до појава на прекин (кршење), односно да ја одредат жилавоста на хибридно заварените проби во металот на заварот, зоната на линија на фузија и зоната под влијание на топлина. Вредностите на жилавост определени при минималните и максималните вредности на параметрите во експерименталниот простор се прикажани на слика 5.19 и слика 5.20. На слика 5.21 е прикажано влијанието на вкупното количество внесена енергија на единица должина на заварот врз жилавоста во металот на заварот во горна зона односно во зоната на електричниот лак.



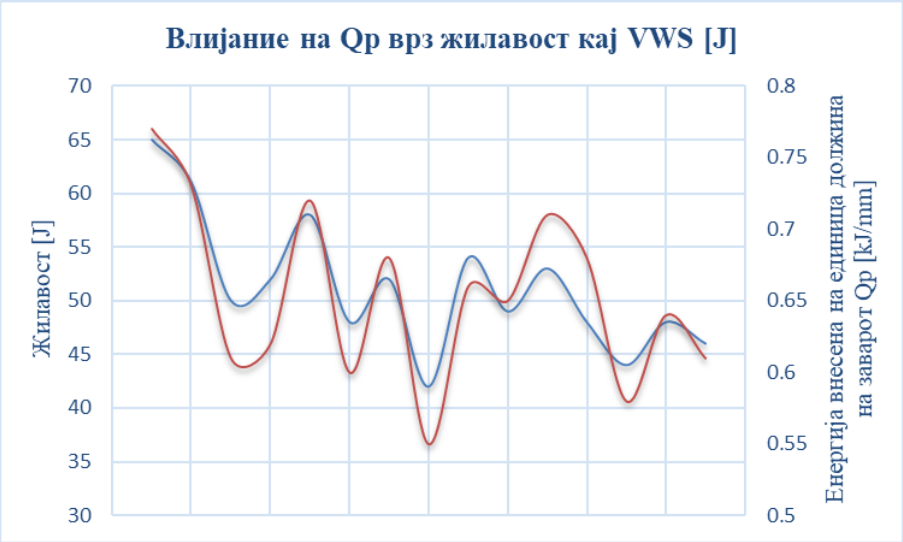
Слика 5.19. Графички приказ на жилавост по Шарпи кај хибриден завар бр. 5-1 изведен со параметри: P_L = 11.5 (kW), I_Z= 329 (A) и V_Z = 1.8 (m/min); O_P = од 0.77 (kJ/mm^2)



Слика 5.20. Графички приказ на жилавост по Шарпи кај хибриден завар бр. 12-1 изведен со параметри: P_L = 11.5 (kW), I_Z= 303 (A) и V_Z = 2.2 (m/min); O_P = од 0.55 (kJ/mm^2)

Генерално, резултатите од епруветите за испитување на жилавост во металот на заварот од страна на лицето на заварот (VWS) или зоната на електричниот лак покажуваат слични вредности и сите ја надминуваат граничната вредност од 27 (J) при температура од -20 (ºC). Иако има мало намалување на жилавост во големина од 65 (J) на 42 (J) при намалена внесена енергија од 0,77 (kJ/mm^2) на 0,55 (kJ/mm^2), сепак овој пад во апсорбираната енергија во заварот е незначителен, дадено на слика 5.21. Ова посочува дека микроструктурата во металот на заварот во зона на електричниот лак е главно под влијание на додатниот материјал, а како секундарен влијателен фактор се појавува внесената енергија на единица должина на заварот. Од друга страна, во зоната на ласерскиот сноп се појавува поголема варијација на вредностите на жилавост поради недостаток на додатен материјал и целосно влијание на внесеното количество на енергија на единица должина, што е докажано преку испитување на епруветите

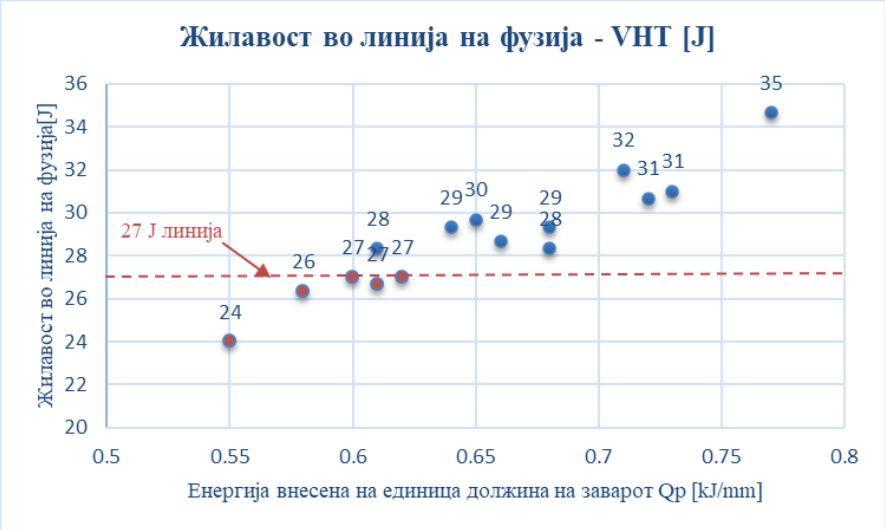
со ознака VWT. Резултатите се прикажани на слика 5.22. Поради ова, жилавост во зона на ласерскиот сноп од страна на коренот е покритична и потребна е поголема моќност од страна на ласерскиот сноп како би се намалила брзината на ладење во самиот завар и неговата околина.



Слика 5.21. Влијание на Qp врз жилавост во металот на заварот во зона на електричен лак

Анализирајќи ги резултатите од графичкиот приказ на слика 5.19 и слика 5.20 се согледува дека најниски вредности на жилавост се постигнати во зона на линија на фузија, потоа следува зона под влијание на топлина и највисоки во зона на металот на заварот. Намалувањето на жилавост во зона под влијание на топлина е резултат на формирање на крта микроструктура поради недостаток на додатен материјал и големи брзини на ладење. Дополнително, определена е правопропорционална зависност помеѓу моќноста на изворите на енергија и жилавоста, додека брзината на заварување негативно влијае поради зголемување на брзината на ладење.

Слика 5.22. Влијание на Qp врз жилавост во металот на заварот во насока нормална на оската на завар



Слика 5.23. Влијание на Qp врз жилавост во линија на фузија во насока нормална на оската на завар

Врз основа на постигнатите резултати, иако кај сите хибридни завари е постигната прифатлива жилавост во металот на заварот > 27 (J), се укажува да се даде препорака количината на внесена енергија на единица должина да биде во интервал од 0,6 (kJ/mm^2) до 0,8 (kJ/mm^2).

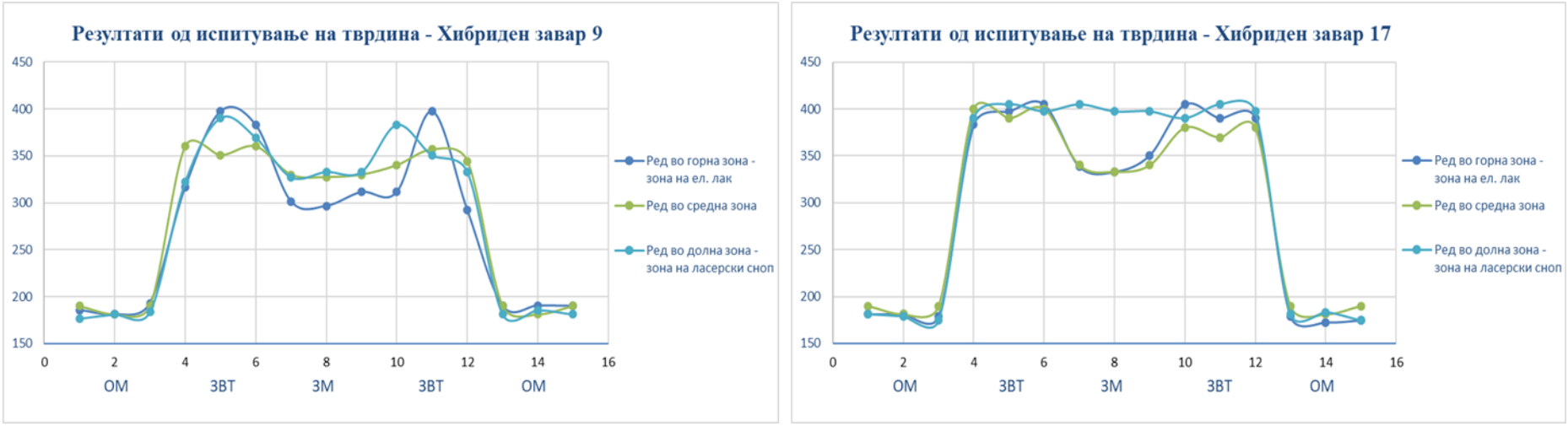
Резултатите на жилавост во зона на линија на фузија покажуваат пониска жилавост во споредба со металот на заварот, поради формирање на покрта микроструктура во зона под влијание на топлина, кои се особено изразени при внесена количина на енергија < 0,6 (kJ/mm^2). Зголемена жилавост во линија на фузија е постигната кај заварените проби со зголемено количество на внесена енергија, што значи поголем внес на топлина доведува до поголема жилавост. Оваа констатација е поврзана со формирање на помеки микроструктури кои се развиваат при помали брзини на ладење. Сепак, од некои истражувачи е констатирано прекумерен внесе на енергија > 2 (kJ/mm^2) е потребно да се избегнува поради формирање на крупнозрната микроструктура и негативно влијание врз жилавост во зона под влијание на топлина [7]. Спротивно, најниските вредности се секогаш поврзани со појава на пукнатини по должина на линијата на фузија.

Како заклучок, задоволувачки вредности на жилавост во зона на линија на фузија се постигнати при внес на енергија во интервал од 0,6 (kJ/mm^2) до 0,8 (kJ/mm^2) и на тој начин ова количество на внесена енергија на единица должина на заварот е оптимално решение за добивање на прифатлива жилавост во самиот завар и неговата околина.

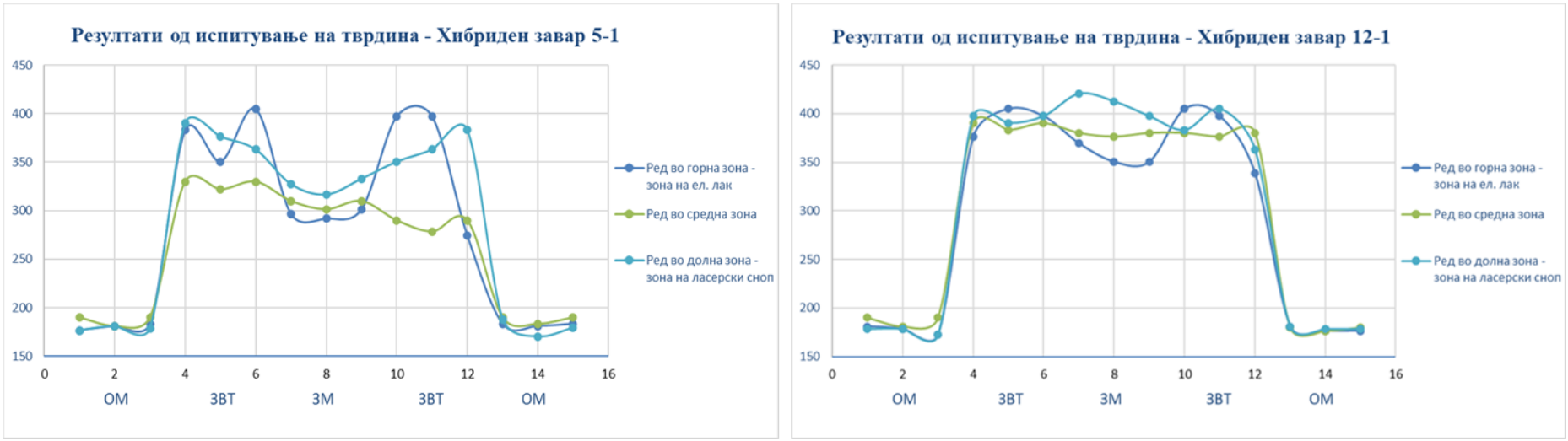
5.6. Резултати и анализа на податоци од испитување на тврдина

Резултатите од испитување на тврдина покрај тоа што се користат за запознавање на карактеристиките на хибридниот завар, се користат и за контрола на вредностите кои се добиени при останатите механички испитувања. Испитувањето на тврдина е изведено на температура од 20±5 (ºC) со HV10 според ISO 9015-1 и ISO 22826. Мерните места на кои е извршено испитувањето се прикажани на слика 4.27, а на наредните слики се прикажани кривите на измерена тврдина во повеќе редови кај хибридни завари изведени со најниска и највисока брзина на заварување (слика 5.24), односно при минимални и максимални вредности на параметрите од експерименталниот простор (слика 5.25).

.



Слика 5.24. Графички приказ на измерена тврдина по Викерс со параметри: а) 9 P_L = 13 (kW), I_Z= 303 (A) и V_Z = 1,8 (m/min); b) 17 P_L = 12,5 (kW), I_Z= 303 (A) и V_Z = 2,2 (m/min)



Слика 5.25. Графички приказ на измерена тврдина по Викерс со параметри: а) 5-1 P_L = 13 (kW), I_Z= 329 (A) и V_Z = 1,8 (m/min); b) 12-1 P_L = 11,5 (kW), I_Z= 303 (A) и V_Z = 2,2 (m/min)

Од графичките прикази на слика 5.24 и слика 5.25 може да се забележи дека највисоки вредности на тврдина се јавуваат во:

- горниот дел на заварот, во зона под влијание на топлина (ЗВТ), и
- долниот дел на заварот, во зона на линија на фузија и металот на заварот.

Овие зголемени вредности можат директно да се поврзат со формирање на покрта микроструктура во наведените зони. Дополнително, кај сите испитани епрувети без разлика на брзината на заварување или количеството на внесена енергија по единица должина се утврдени две карактеристични криви на распределба на тврдина.

Во горната зона, односно во областа на електричен лак, се добива таканаречена крива „М“, каде што највисоката тврдина е регистрирана во зоната под влијание на топлина поради формирање на крупнозрната структура, по што вредностите постепено се намалуваат кон линијата на фузија и металот на заварот. Измерените вредности во металот на заварот во зона на електричен лак се во интервал од 300 HV до 310 HV, а во зоната под влијание на топлина се во интервал од 390 HV до 400 HV. Според стандардот ISO 15614–1 максимално дозволената тврдина изнесува 350 HV. Овој стандард не го опфаќа хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак. Пониските вредности на тврдина во металот на заварот покрај тоа што се во функција од брзината на заварување, значително зависат и од видот на додатниот материјал.

Кривата на тврдина во долната зона на заварот има друг облик од кривата во горната зона, односно во областа на ласерскиот сноп каде што тврдината постепено се зголемува, почнувајќи од најниски вредности во основниот материјал продолжува кон зоната под влијание на топлина и достигнува максимални вредности во металот на заварот. Измерените вредности на тврдина се движат во интервал од 300 HV до 370 HV, при што во одделни точки се регистрирани и максимални вредности од 400 HV. Споредбено со зоната на електричниот лак каде тврдината зависи и од видот на додатниот материјал, во зоната на ласерскиот сноп тврдината е најмногу условена од брзината на заварување, додека влијанието на додатниот материјал е занемарливо.

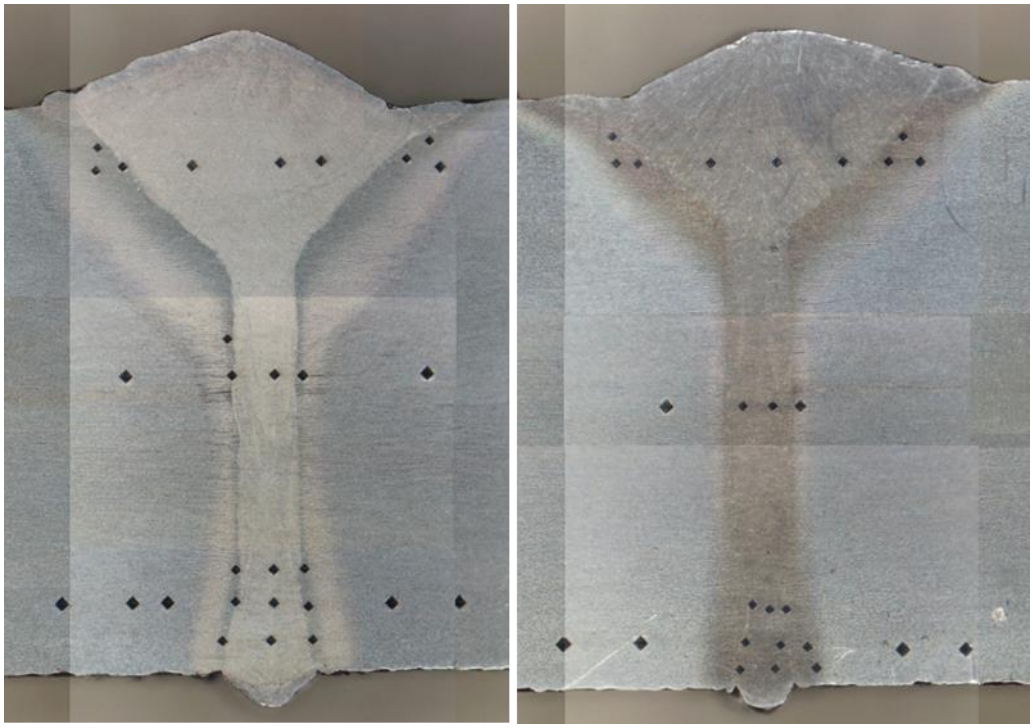
Анализата на добиените резултати покажува дека зголемувањето на брзината на заварување при константни вредности на останатите параметри од процесот на заварување доведува до зголемена тврдина. Ова влијание е особено изразено со вредностите на тврдина измерени во средна зона, односно при брзини на заварување од 1,8 (m/min) пресметаната просечна тврдина во оваа зона е 300 HV, а при брзина од 2,2 (m/min) пресметаната просечна тврдина е 350 HV. Овој ефект може да се поврзе со зголемени брзини на ладење кои доведуваат до формирање на покрта микроструктура. Следствено, зголемување на количината на внесена топлина по единица должина на заварот има позитивно влијание врз целокупната тврдина на хибридниот завар, а ефектот е најизразен во зоната на ласерскиот сноп. Согласно исражувачот Wallerstein [4], кај хибридни завари во зоната под влијание на топлина може да се забележат вредности на тврдина од 450 HV при мали количини на внесена топлинска енергија по единица должина на заварот. Овие високи вредности се резултат на појава на крта микроструктура, доминантно мартензитна и баинитна структура.

Констатацијата дека тврдината зависи од брзината на заварување може да се согледа и преку добиените резултати за затегнувачка јакост и жилавост на хибридните завари. Со зголемување на брзината на заварување се забележува намалување на единечното издолжување, што укажува на намалена појава на пластичност. Ова е последица на формирање на покрта микроструктура се одликува со висока тврдина, но и ограничена способност за деформација. Дополнително, најниски вредности на жилавост се забележани во зона под влијание на топлина поради недостаток на додатен материјал и големи брзини на ладење кои се во зависност од брзината на заварување.

5.7. Резултати и анализа на податоци од металографски испитување

Металографските испитувања претставува еден од најзначајните методи за анализа на микроструктурата и карактеристиките на хибридниот завар. Микроструктурата на завар изведен со хибридно заварување минува низ истите фазни трансформации како и завар изведен со конвенционален процес на заварување. Оттука, основен фактор кој го определува процесот на формирање и трансформирање на микроструктурата е времето на термичко дејство. Поради тоа, за анализа и определување на микроструктурата на хибридниот завар се користи анизотермички ТВТ (температура-време-трансформација) дијаграм, кој овозможува согледување на целокупните трансформации како функција од температурата и времето на задржување.

На слика 5.26 се прикажани макрографски снимки на хибридни завари изведени со најниско и највисоко количество на внесена топлина по единица должина на заварот во рамки на експерименталниот простор, односно хибридни завари со ознака 5–1 и 12–1.

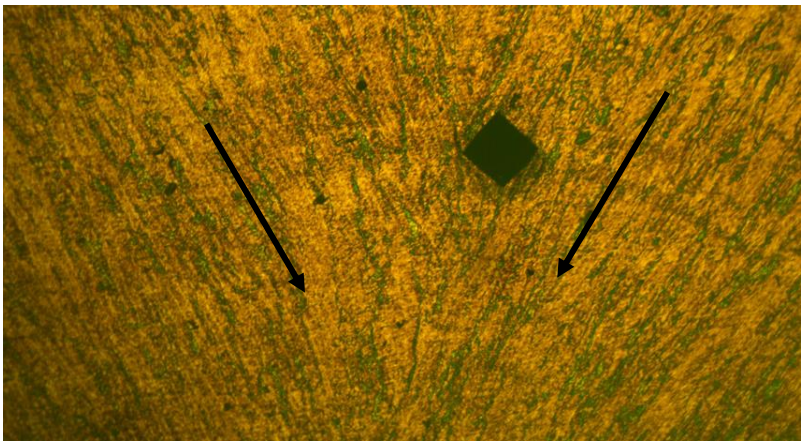


a) 5-1 Qp = 0,77(kJ/mm); b) 12-1 Qp = 0,55(kJ/mm)

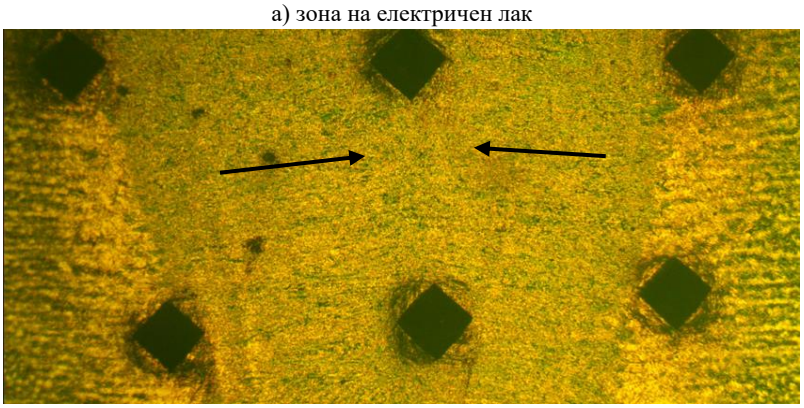
Слика 5.26. Макрографски снимки на хибридни завари:

Согласно макрографските снимки, кај хибридните завари се идентификувани два вида на кристализација, *примарна* и *секундарна кристализација*. Дополнително, утврдено е дека ширината на заварот и зоната под влијание на топлина се проширува со зголемување на количеството на внесена топлина по единица должина на заварот, особено во зоната на ласерскиот сноп. Зголемување на моќноста на изворите на топлина во комбинација со намалување на брзината на заварување доведува до пониска брзина на ладење што резултира во формирање на крупнозрната структура во зоната под влијание на топлина. Контролата на брзината на ладење во самиот завар и зоната под влијание на топлина е значајна за оптимизација на фазните трансформации при секундарна кристализација како и за постигнување на поволни механички карактеристики на заварот.

Карактеристичните микроструктури кои се појавуваат во зона на електричен лак и зона на ласерски сноп се прикажани на слика 5.27, каде што векторите ја означуваат насоката на дендритите. Забележливо е дека во двете зони се појавуваат насочени дендрити (долги тесни кристали) кои во зона на електричен лак покажуваат анизотрпоност, карактеристично за конкурентен раст на зрната. За разлика од тоа, во зона на ласерски сноп е јасно изразена централна зона со поеквивалетни зрна, опкружена со зона составена од издолжени зрна кои се насочени кон основниот материјал. Оваа разлика во микроструктурата произлегува од фактот што зона на електричен лак подлежи на поголемо количество на внесна топлина и соодветно пониска стапка на ладење, во споредба со зона на ласерски сноп.



a) зона на електричен лак



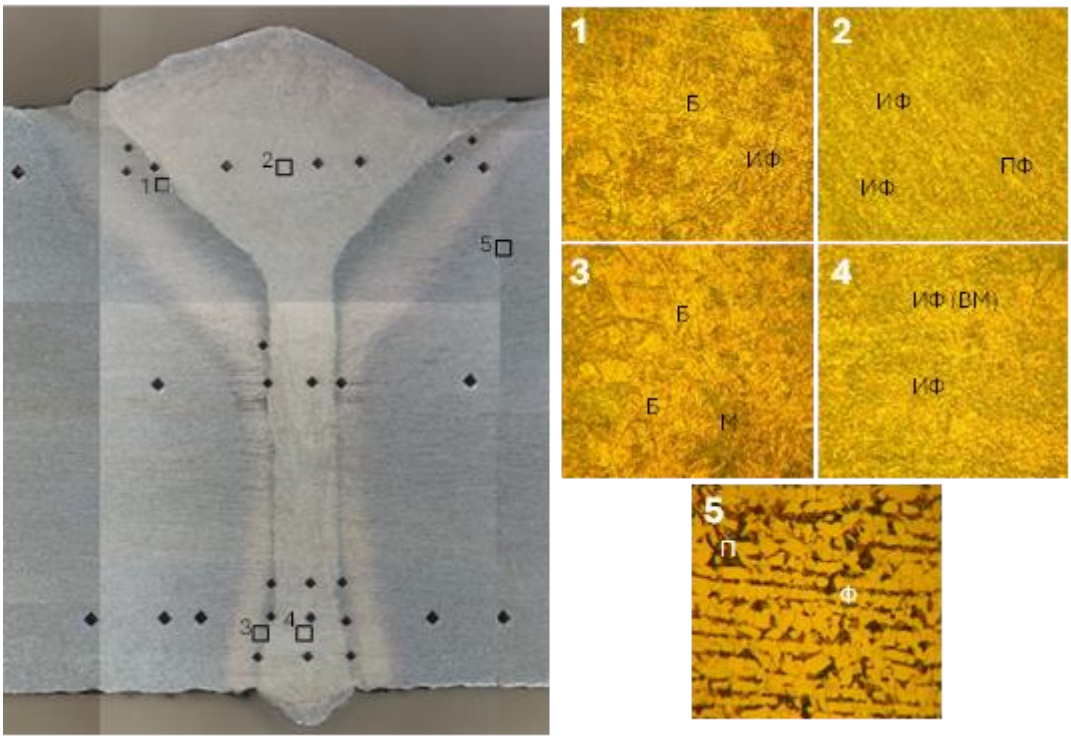
b) зона на ласерски сноп

Слика 5.27. Карактеристични микроструктури (x40)

Горната зона на заварот, поради непосредната близина до изворите на топлина, а особено до електричниот лак, апсорбира поголема количина на топлина, додека зоната на ласерот се загрева претежно од ласерскиот сноп. Како резултат, а земајќи го предвид ефектот на брзото ладење, евидентно е дека топлината се движи од зоната на електричниот лак кон зоната на ласерскиот сноп, формирајќи дендрити во иста насока. Во зоната на ласерскот сноп, топлината јасно се одведува од внатрешноста на заварот кон основниот материјал, што доведува до формирање на дендрити нормални на линијата на топење, односно во насока на најголемата брзина на кристализација.

Микроструктурата во металот на заварот и во зоната под влијание на топлина е под големо влијание на брзината на ладење каде што диференцијалот на температурата на ладење ($\Delta t_{8/5}$) кој е во интервал од 800 (°C) до 500 (°C) директно зависи од количеството на внесена топлина. Влијанието е особено изразено кај конструктивни челици кои поседуваат повисока содржина на јаглерод, односно кои имаат поголеми вредности на C_{ekv}.

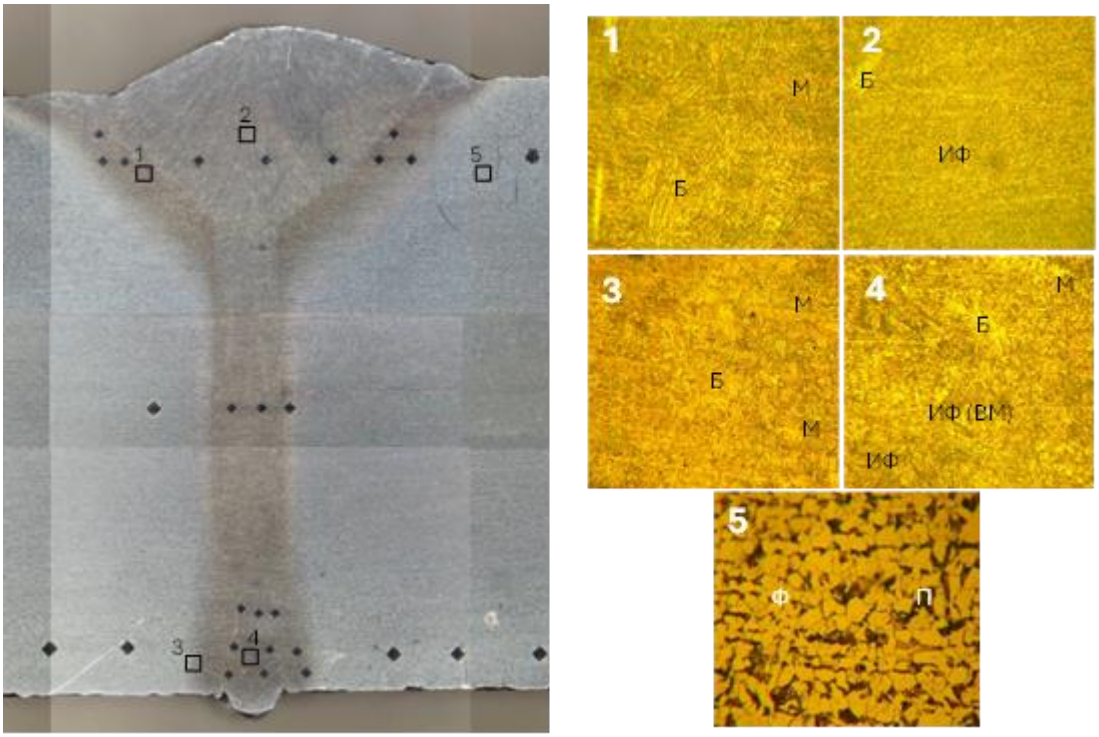
Следствено на слика 5.28 и слика 5.29 е прикажана споредбена анализа на микроструктурни снимки во зона на електричен лак и во зона на ласерски сноп, добиени при најниско и највисоко количество на внесена топлина по единица должина на заварот во рамки на експерименталниот простор.



1) ЗВТ-горна зона, 2) метал на завар-горна зона, 3) ЗВТ-долна зона, 4) метал на завар-долна зона 5) основен материјал
Слика 5.28. Микроструктура на хибриден завар 5-1 (x400)

Од сликите може да се забележи дека микроструктурата на основниот материјал е составена од ферит и насочен перлит, односно претставува феритно–перлитна структура со изразени редови како резултат на процесот на валање.

Во зоната под влијание на топлина и кај електричниот лак и кај ласерскиот сноп се забележува крупнозрната структура. Поради задржување на солидус температурата, аустенитот се трансформира во крупнозрнеста феритно–перлитна структура со игличест облик, односно поради тоа што брзината на ладење е помала од 3 (s), ($\Delta t_{8/5}$<3 s), аустенитот преминува во баинит и мартензит независно од количеството на внесена топлина. Може да се забележи дека кај хибирдниот завар со ознака 5-1 поради поголемото количество на внесена топлина намалено е формирањето на мартензитна структура со изразено присуство на баинит и појава на игличест ферит во горна зона, споредбено со хибридниот завар со ознака 12-1. Добиените резултати се во согласност со истражувањето на Wallerstein [4] каде што е наведено дека зголемувањето на количеството на внесена топлина доведува до намалување на мартензитната структура и појава на горен баинит во зоната на ласерскиот сноп, додека во зоната на електричниот лак нема значајни промени.



1) ЗВТ–горна зона, 2) метал на завар–горна зона, 3) ЗВТ–долна зона, 4) метал на завар–долна зона 5) основен материјал
Слика 5.29. Микроструктура на хибриден завар 12-1 (x400):

Во металот на заварот е постигната значителна разлика во микроструктурата со зголемување на количеството на внесена топлина по единица должина на заварот, особено во зоната на ласерскиот сноп. Генерално, во горна зона се јавува игличест ферит и полигонален ферит кој се карактеризира со помала затегнувачка јакост и поголема еластичност. Формирањето на ваква микроструктура е резултат на доведувањето на додатен материјал, како и релативно поголемото количество на внесена топлина создадено од комбинирано дејство на електричниот лак и ласерскиот сноп.

Од друга страна, долната зона во металот на заварот, односно зоната на ласерскиот сноп, се карактеризира со микроструктура составена претежно од игличест ферит со издолжени зрна

кои наликуваат на Видманштетова структура и делумно баинитна структура. Со зголемување на количеството на внесена топлина, баинитната структура постепено исчезнува, што резултира во намалена тврдина и зголемена жилавост во металот на заварот. Оваа појава е потврдена со кривите на измерена тврдина, каде што металот на заварот има тврдина од 300 HV што се должи на формирање на игличест ферит, дадено на слика 5.25. Според истражувачите Babu и David, игличестиот ферит и баинит се создаваат на идентичен начин, но кристализацијата започнува на различни места, при што игличестиот ферит се формира во внатрешноста на аустенитните зрна, а баинитот по границите на аустенитните зрна [124]. Оттука, поголемото количество на внесена топлина влијае на поголем раст на аустенитните зрна, што доведува до зголемување на бројот на потенцијални места за формирање на игличест ферит, а намалување на баинитната структура. Овој резултат е во согласност со забележаната поголема длабочина на пенетрација во горна зона при зголемување на јачина на струјата на заварување што предизвикува пониски брзини на ладење и соодветно промена во микроструктурниот развој.

Појавата на покрта микроструктура е поврзана со зголемената содржина на јаглерод во челикот, која го зајакнува таложењето на карбиди долж границите на зрната, а воедно ја стабилизира појавата на баинит и мартензит при големи брзини на ладење. Дополнително, јаглеродот го олеснува формирањето на баинит во температурниот интервал помеѓу перлитната и мартензитната област подобрувајќи ја затегнувачката јакост и жилавоста [124].

Формирањето на различни видови на миркоструктура кај хибридните завари, како што се игличест ферит, баинит и мартензит има значително влијае врз механичките карактеристики. Анализирајќи го хибридниот завар со ознака 12-1 може да се согледа дека големите брзини на ладење доведуваат до формирање на мартензитна микроструктура во зоната под влијание на топлина што резултира во намалена жилавост и зголемена тврдина, правејќи го заварот поподложен за појава на крт лом (прекин) при оптоварување. Овој резултат е потврден и преку испитувања на затегнувачка јакост, каде што најниско единечно издолжување е добиено при комбинација на висока брзина на заварување со најмала јачина на струјата за заварување, односно најголеми брзини на ладење во заварот и неговата околина, прикажано на слика 5.13.

Генерално, за постигнување на најповолна микроструктура кај хибридните завари од конструктивен челик S355J2 препорачливо е да се применат постапки на предгревање или термичка обработка послем процесот на заварување, но овие постапки може да резултираат во значително зголемување на трошоците и зголемена ширина на зоната под влијание на топлина. Друга алтернатива е зголемување на количеството на внесена топлина преку зголемување на моќноста на двата извори на топлина. Сепак, ова може да предизвика појава на прокапини од кореновата страна и поткопувања на лицето на заварот.

Резултатите од металографските испитувања и нивната анализа укажуваат дека со правилен избор на параметрите на хибридно заварување може да се обезбеди посакувана микроструктура во целиот хибриден завар. Ова е возможно дури и во зоните каде што неизбежно се појавуваат големи брзини на ладење кои доведуваат до неповолни структурни промени.

6. Статистичка обработка на резултатите од испитување на затегнување

Хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак е процес што зависи од голем број параметри и за негова анализа е потребно да се спроведат експериментални истражувања со кои ќе се опфатат највлијателните фактори. Во методологијата на истражување поглавие 3.4 е наведено дека анализата и обработката на добиените резултати од испитувањето на затегнување се изведува со две методи: *ортогонален* и *Taguchi метод*. Двата методи го дефинираат математичкиот модел со кој се определува влијанието на независно променливите големини.

Во ортогоналниот метод е применет модел 2^3, односно три независни променливи на две нивоа т.е. минимално и максимално ниво. За Taguchi методот е избран модел 3^3, при што се дефинирани 9 комбинации од кои 3 се поклопуваат со комбинациите од ортогоналниот метод.

Вредностите на независно променливите геолемини и нивните интервали на промена во експерименталниот простор се определени врз основа на теоретски и прелиминарни истражувања, а за поедноставно изразување на условите на експериментите и обработка на експерименталните резултати е извршено нивно кодирање, односно:

- X_1 – моќност на ласерски сноп, P_L(kW): 11,5 – 13 (kW).
- X_2 – брзина на заварување, V_z (m/min): 1,8 – 2,2 (m/min).
- X_3 – јачина на струја на заварување I_z (A): 303 – 329 (A).

6.1. Ортогонален метод

Математичко моделирање на истражуваниот експериментален простор при дизајниран повеќефакторен експеримент се врши со регресивна анализа на влезните големини: x, z, u и излезот y. Самото математичко моделирање се состои во основа од систем на равенки, услови и алгоритамски правила.

6.1.1. Алгоритам за дисперзивна и регресивна анализа на експериментално добиените резултати

Математичката обработка на експериментално добиените резултати, односно регресивната анализа се врши по реализација на повеќефакторниот план, во конкретниот случај, трифакторен централен ортогонален план од втор ред. Обработката се одвива по алгоритам чии составни елементи се:

- определување на коефициентот на регресија;
- проверка на адекватност на регресивниот модел;
- оценка на сигнификантност на коефициентите на регресија во моделот;
- определување на граница на доверливост на точност на регресивниот модел;
- интерпретација на резултатите од испитувањето.

Дисперзијата на повторените експериментални резултати во секоја точка u од планот се определува како:

$$S_i^2 = \frac{S_{Ei}}{f_{Ei}} = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{ni}\left(y_{ij} - y_i\right)^2, \left(i = 1, N\right) \tag{6.1}$$

Хомогеноста на дисперзиите, а со тоа и покорувањето на експериментално добиените резултати на нормалната распределба, се проверува со Kohren-овиот критериум:

$$G_{\max} = \frac{S_i^2\,\max}{\sum_i^N S_i^2} \le G_{tab} \tag{6.2}$$

при што G_{tab} се избира од [112], за веројатност од 95 (%) и степените на слобода N(n-1).

Ако $G_{max}<G_{tab}$ се смета дека дисперзиите се еднородни, ако $G_{max}>G_{tab}$ се смета дека дисперзиите не се еднородни, односно ако Kohren-овиот критериум е исполнет, регресивната анализа на експериментално добиените резултати има смисла.

Бараниот математички модел од втор ред со кој се опишува објектот на експериментирање е од облик:

$$\hat{y} = b_o^{'} + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum_{i\le 1}^{k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^{k} b_{ii} x_i^{'} \tag{6.3}$$

Коефициентите на регресивниот модел се определуваат со:

$$b_o^{'} = \frac{\sum_{u=1}^{N} n_u \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^{N} n_u} \qquad b_i = \frac{\sum_{u=1}^{N} n_u x_{iu} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^{N} n_u x_{iu}^2} \qquad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^{N} n_u x_{iu} x_{ju} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^{N} n_u x_{iu}^2 x_{ju}^2} \qquad b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^{N} n_u x_{iu}^{'} \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^{N} n_u x_{iu}^{'2}} \tag{6.4}$$

Дисперзија на коефициентите на регресивниот модел:

$$S^2(b_o^{'}) = \frac{S^2(y)}{\sum_{u=1}^{N} n_u} \qquad S^2(b_i) = \frac{S^2(y)}{\sum_{u=1}^{N} n_u x_{iu}^2} \qquad S^2(b_{ij}) = \frac{S^2(y)}{\sum_{u=1}^{N} n_u x_{iu}^2 x_{ju}^2} \qquad S^2(b_{ii}) = \frac{S^2(y)}{\sum_{u=1}^{N} n_u x_{iu}^{'2}} \tag{6.5}$$

Оцена на значајноста на коефициентите на регресивниот модел се врши со Student-овиот критериум:

$t_{ri} = \frac{|b_i|}{S(b_i)}$, ако е $t_{ri} \ge t_{ti}$ коефициентот е значаен, при тоа t_{ti} се избира од [112], за веројатност од 95% и степен на слобода N(n-1).

Дисперзијата на регресивниот модел се определува како:

$$S^2(\hat{y}) = \frac{1}{N-(d+1)} \sum_{u=1}^{N} \left(\bar{y}_u - \hat{y}_u \right)^2 \tag{6.6}$$

каде (d+1) е вкупен број на коефициенти на моделот.

Проверка на адекватност на моделот се врши со Fischer-овиот критериум:

$$F_r = \frac{\frac{S_R}{f_R}}{\frac{S_E}{f_E}} = \frac{S_R^2}{S^2(y)} \tag{6.7}$$

ако е $F_r < F_{tab}$ моделот е адекватен приказ на анализираниот објект, при тоа F_{tab} се избира од [112], за веројатност од 95% и степени на слобода N(nu-1) и N-(d+1).

6.1.2. Обработка на експериментално добиените резултати

Основната цел на обработка на резултатите од експерименталното истражување е да се определи математички модел за определување на затегнувачка јакост на хибридниот завар во зависност од независно променливите големини P_L, V_z и I_z. Обработката е извршена со помош на персонален сметач со програмски пакет чиј алгоритам е според референцата [112], изработен од проф. д-р Добре Рунчев.

Претходно е напоменато дека за поедноставна обработка на експерименталните резултати е извршено кодирање на независно променливите големини со X_1, X_2 и X_3, додека нивоата на промена се кодирани т.е. минимално ниво (-1) и максимално ниво (+1).

Излезната големина претставува функција од независно променливите големини и се нарекува регресивна равенка: $Y = f(X_1, X_2, X_3)$.

Табела 6.1. Кодирана матрица на планот

Број на експерименти	Кодирани вредности								
	X0	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1X2X3	Y
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	Y1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	Y2
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	Y3
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	Y4
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	Y5
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	Y6
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	Y7
8	1	1	1	1	1	1	1	1	Y8

Во Табела 6.2 се дадени експерименталните резултати од измерената затегнувачка јакост, нивните средни вредности во една точка од планот и дисперзијата на повторените експериментални резултати во секоја точка од планот.

Табела 6.2. Измерени вредности од планот

Број на експерименти	Измерени вредности - Затегнувачка јакост Rm (N/mm^2)			Збир од вредности Su	Средни вредности Su	Дисперзија Si^2
1	688	679	675	2042	680.67	44.33
2	740	699	705	2144	714.67	490.33
3	574	610	614	1798	599.33	485.33
4	628	637	650	1915	638.33	122.33
5	706	719	732	2157	719	169
6	736	730	744	2210	736.67	49.33
7	676	671	661	2008	669.33	58.33
8	700	703	723	2126	708.67	156.33

Вредностите на коефициентите B(i, j) се:

683,3337 16,2512 (-29,4187) 25,0837 3,3337 (-1,9988) 10,0013 2,0837.

Степен на слобода на експериментот во иста точка од планот n-1: 2.

Степен на слобода на експериментот во сите точки од планот N(n-1): 16.

Еднородноста на дисперзиите, а со тоа и покорувањето на експериментално добиените резултати на нормалната распределба се проверува со Kohren-овиот критериум за веројатност од 95 (%), односно G_{tab} се избира на страна 442/3 од референцата [112], односно таа изнесува $G_{tab} = 0,322$.

Поради тоа што $G_{max} = 0,31 < G_{tab} = 0,322$ се смета дека

ДИСПЕРЗИИТЕ се ЕДНОРОДНИ.

Вкупната дисперзија изнесува: 1575,31.

Средна дисперзија на резултатот е $S^2_{sr} = 196,91370$.

Дисперзијата на експерименталните резултати е $S^2(y) = 98,45686$.

Дисперзијата на коефициентите на регресија е $S^2(bi) = 4,102$ и $S(bi) = 2,025$.

Степен на слобода е $N(n-1) = 16$.

За Student-овиот критериум за веројатност од 95 (%) и претходниот степен на слобода на страна 429 од референцата [112] се добива: 1.75.

Критична вредност на коефициентот $B_{kr} = 3,54450$.

Границата на доверба за B(i, j) е Delta bi = $\pm$ 3,54450.

Во наредната табела се дадени пресметаните вредности на коефициентите B(i, j) и нивните гранични вредности:

B(i, j)	min B(i, j)	max B(i, j)
683.3337	679.7892	686.87818
16.2512	12.7067	19.7957
-29.4187	-32.9632	-25.8742
25.0837	21.5392	28.6282
3.3337	-0.2108	6.8782
-1.9988	-5.5433	1.5457
10.0013	6.4568	13.5458
2.0837	-1.4608	5.6282

Меродавни се следните коефициенти B(i, j):

683,3337 16,2512 (-29,4187) 25,0837 ,0000 ,0000 10,0013 ,0000

Регресивната равенка го има следниот облик:

$$Fcr = 683{,}334 + 16{,}251X_1 - 29{,}419X_2 + 25{,}084X_3 + {,}000X_1X_2 + {,}000X_1X_3 + 10{,}001X_2X_3 + {,}000X_1X_2X_3 \quad (6.8)$$

Во определениот регресивен модел, заменувајќи ги вредносите за X_1, X_2 и X_3 се добиваат пресметани вредности за излезната големина, затегнувачка јакост (Rm) соодветно за секоја точка од планот на експериментот дадени во следната табела:

Експериментални резултати - измерени вредности			Пресметани вредноси со моделот	Отстапување		
$Rm(N/mm^2)$	$Rm(N/mm^2)$	$Rm(N/mm^2)$	$Rm(N/mm^2)$	%	%	%
688	679.00	675.00	681.418	-0.97	0.35	0.94
740	699.00	705.00	713.921	-3.65	2.09	1.25
574	610.00	614.00	602.578	4.74	-1.23	-1.90
628	637.00	650.00	635.081	1.11	-0.30	-2.35
706	719.00	732.00	711.583	0.78	-1.04	-2.87
736	730.00	744.00	744.085	1.09	1.89	0.01
676	671.00	661.00	672.748	-0.48	0.26	1.75
700	703.00	723.00	705.251	0.74	0.32	-2.52

Во наредната табела се дадени пресметаните вредности на излезната големина, затегнувачка јакост (Rm) и нејзините гранични вредности во интервал:

Пресметани вредности	Интервал на доверба	
	од	до
681.4188	677.8743	684.9633
713.9212	717.4657	710.3767
602.5788	599.0343	606.1233
635.0812	638.6257	631.5367
711.5836	715.1281	708.0391
744.086	740.5415	747.6305
672.7488	676.2933	669.2043
705.2512	673.3507	737.1517

Дисперзијата на нееднакватност-адекватност е S_r^2 = 116,70600.

Fischer-овиот критериум е F_r = 1,185.

Степен на слобода е N(n-1) = 16.

Степен на слобода е N-(n+1) = 4.

Проверка на адекватност на математичкиот модел се врши со Fischer-ов тест или критериум за веројатност од 95% и претходните степени на слобода, на страна 432 од референцата [112] и се добива:

$$F_{tab} = 3{,}010$$

Поради тоа што $F_r = 1{,}185 < F_{tab} = 3{,}010$ се смета дека регресивната равенка со следниот облик е адекватен приказ на бараната зависност:

$$Fcr = 683{,}334 + 16{,}251X_1 - 29{,}419X_2 + 25{,}084X_3 + {,}000X_1X_2 + {,}000X_1X_3 + 10{,}001X_2X_3 + {,}000X_1X_2X_3$$

односно нејзиниот облик само со сигнификантните променливи е следен:

$$Fcr = 683{,}334 + 16{,}251X_1 - 29{,}419X_2 + 25{,}084X_3 + 10{,}001X_2X_3 \quad (6.9)$$

Со декодирање на X_1, X_2 и X_3 се добива:

$$X_1 = 1{,}333 \times F1 - 16{,}3333$$

$$X_2 = 5{,}000 \times F2 - 10{,}00000$$

$$X_3 = {,}077 \times F3 - 24{,}30769$$

Со замена на претходните вредности за X_1, X_2 и X_3 се добива декодираната регресивна равенка во облик:

$$F = 2533{,}44 + 21{,}6683F1 - 1362{,}6360F2 - 5{,}7638F3 + {,}0000F1F2 + {,}0000F1F3 + 3{,}8467F2F3 + {,}0000F1F2F3 \quad (6.10)$$

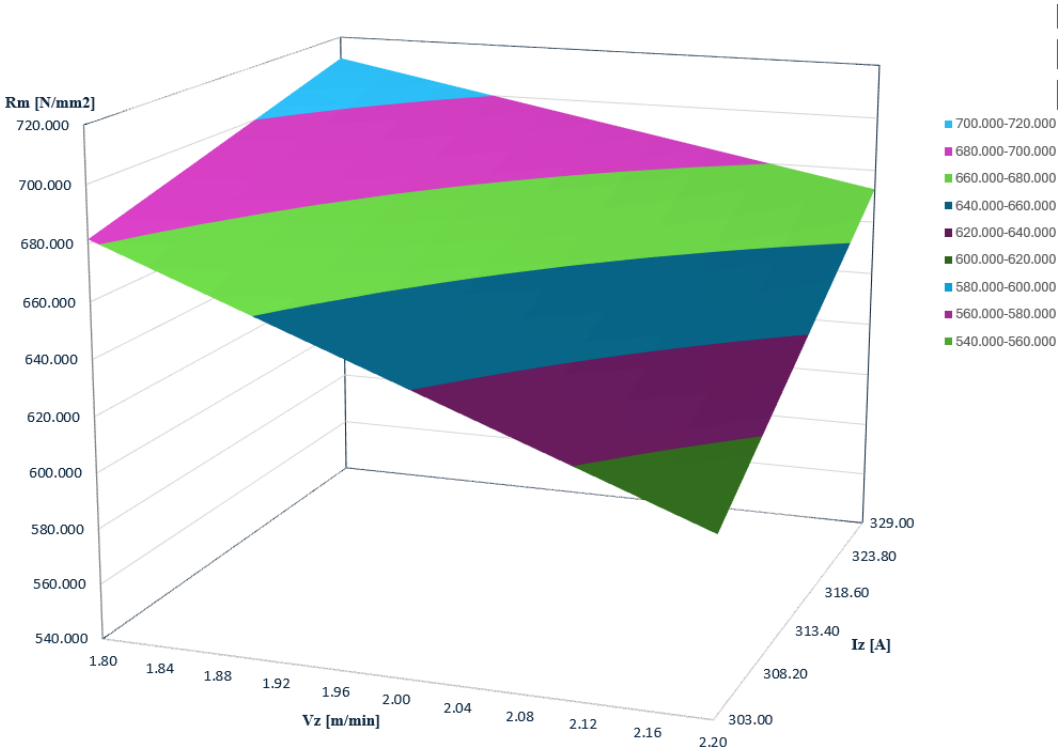
односно нејзиниот поедноставен облик е следен:

$$F = 2533{,}44 + 21{,}6683F1 - 1362{,}6360F2 - 5{,}7638F3 + 3{,}8467F2F3 \quad (6.11)$$

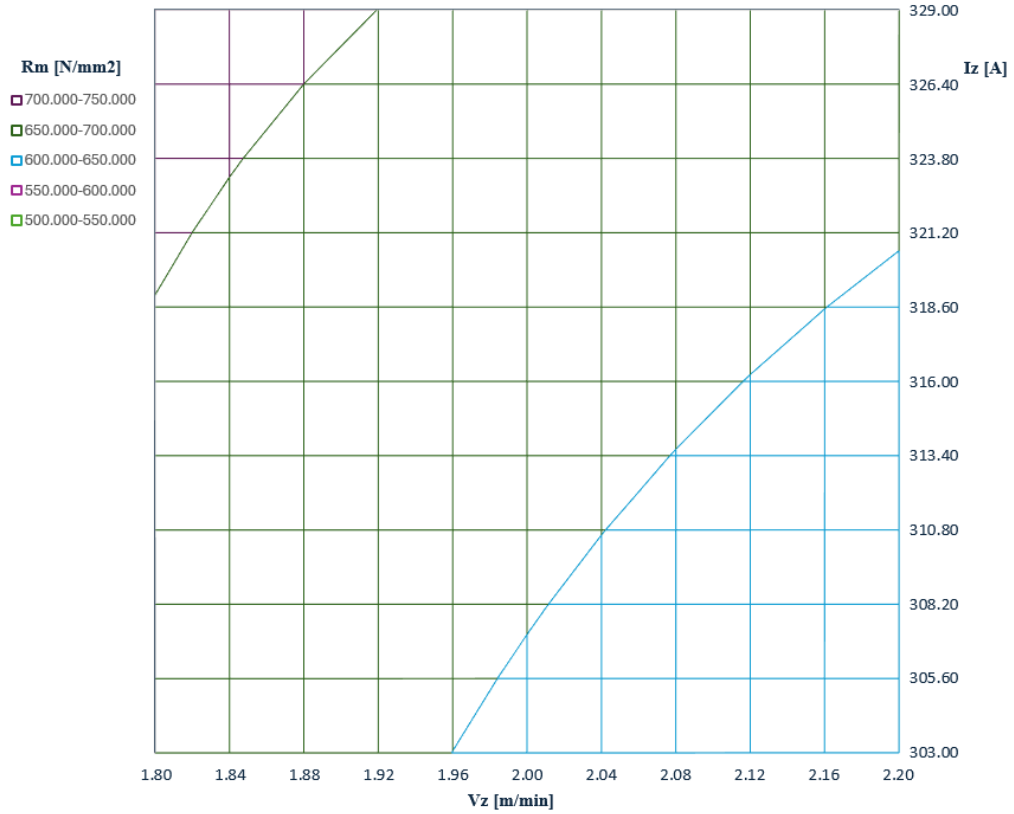
при што влезните вредности се внесуваат во: P_L(kW), V_z (m/min) и I_z (A), а излезот Rm (N/mm^2).

Со воспоставениот математички модел за бараната зависност извршена е контрола на средната точка од експерименталниот простор, дадено во следната табела:

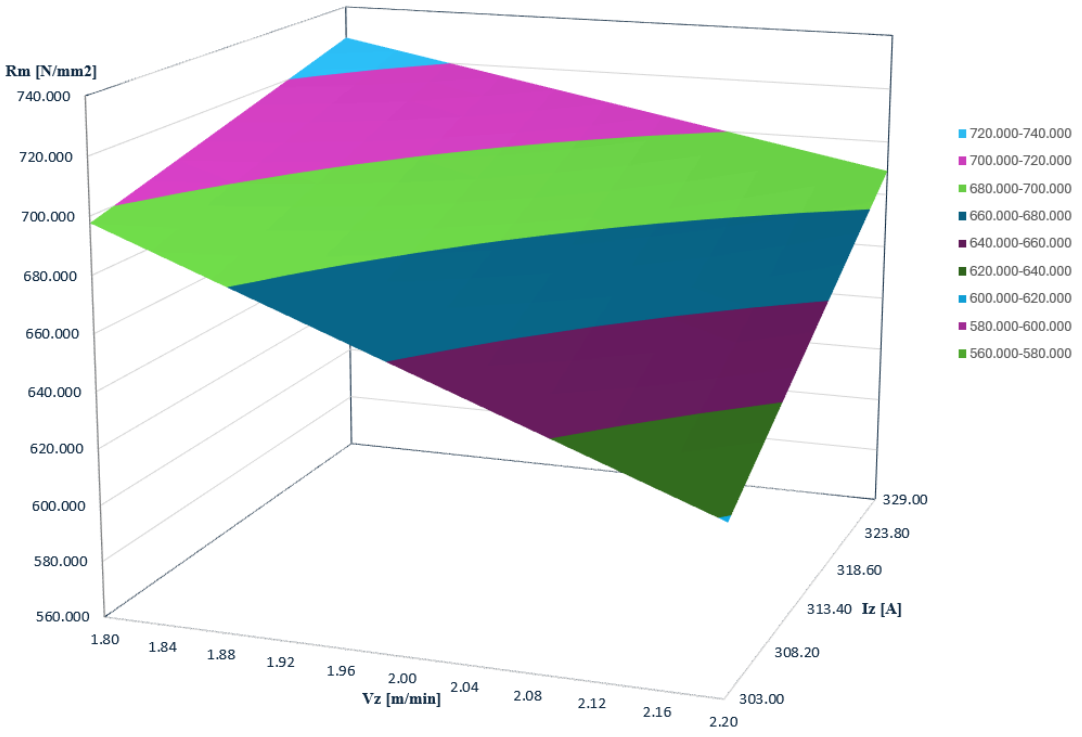
Параметри на заварување во средната точка од експерименталниот простор			Експериментални резултати - измерени вредности			Пресметани вредности со моделот	Отстапување		
PL(kW)	Vz (m/min)	Iz (A)	Rm(N/mm^2)	Rm(N/mm^2)	Rm(N/mm^2)	Rm(N/mm^2)	%	%	%
12.20	2.00	316.00	701.00	691.00	707.00	682.250	-2.75	-1.28	-3.63



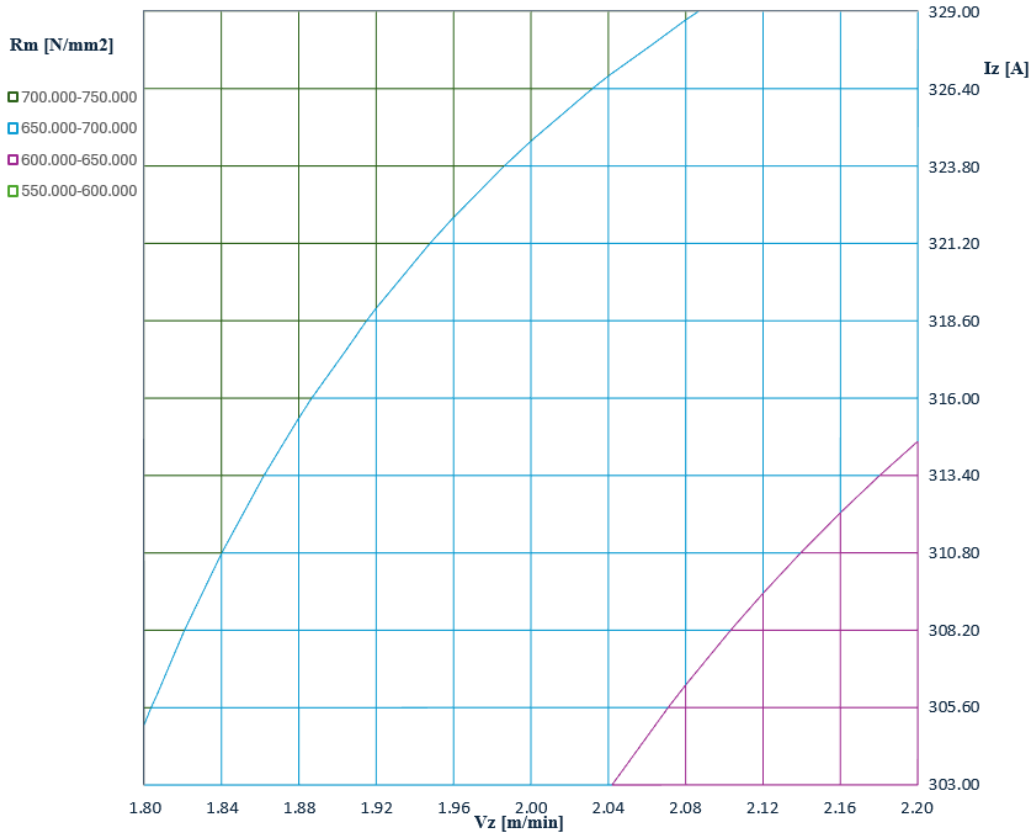
Слика 6.1. 3Д графички приказ на моделот при P_L(min) = 11,5 (kW)



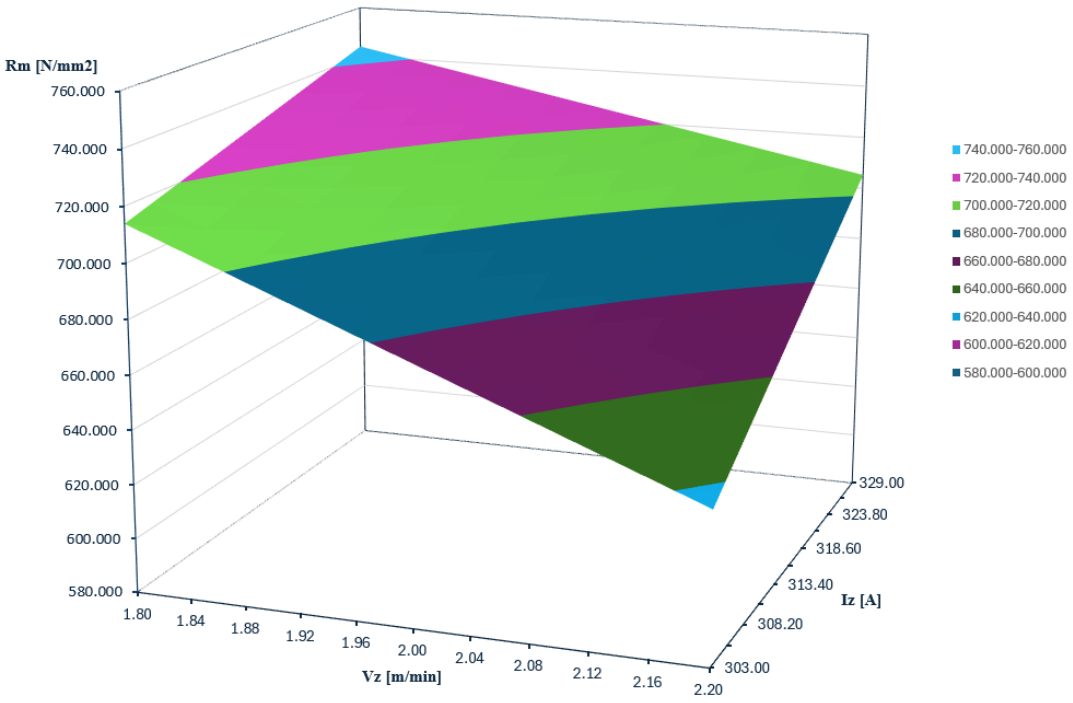
Слика 6.2. 2Д графички приказ на моделот при P_L(min) = 11,5 (kW)



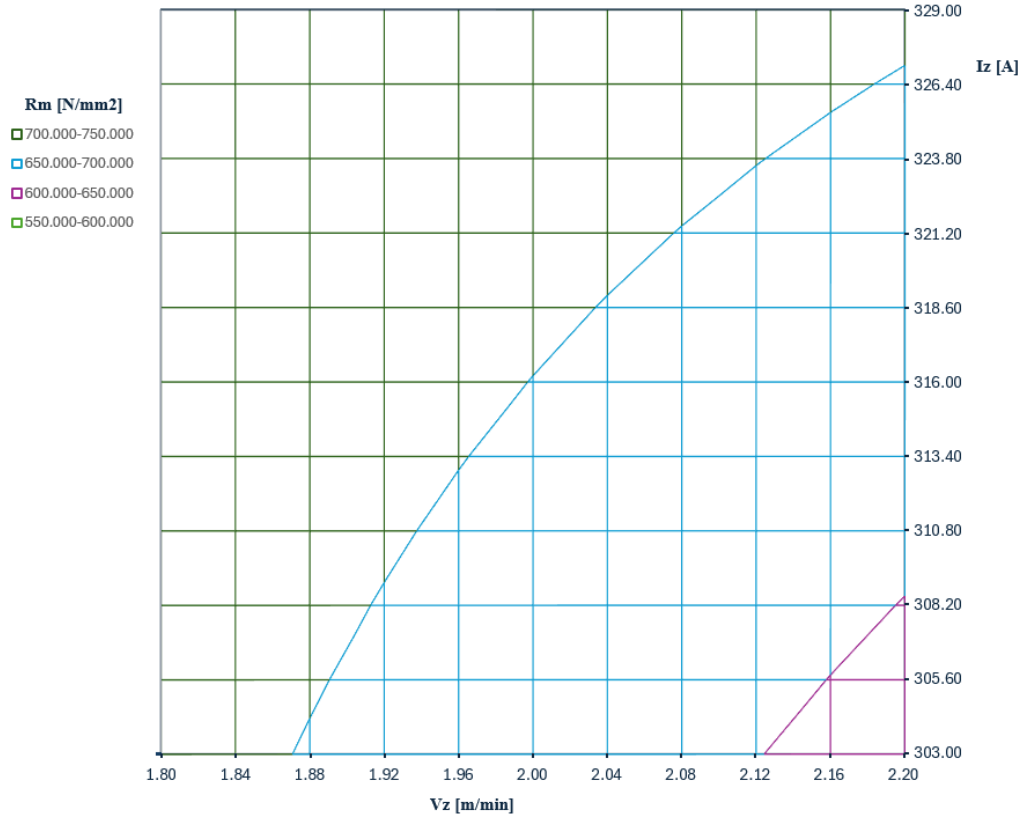
Слика 6.3. 3Д графички приказ на моделот при P_L(srd) = 12,2 (kW)



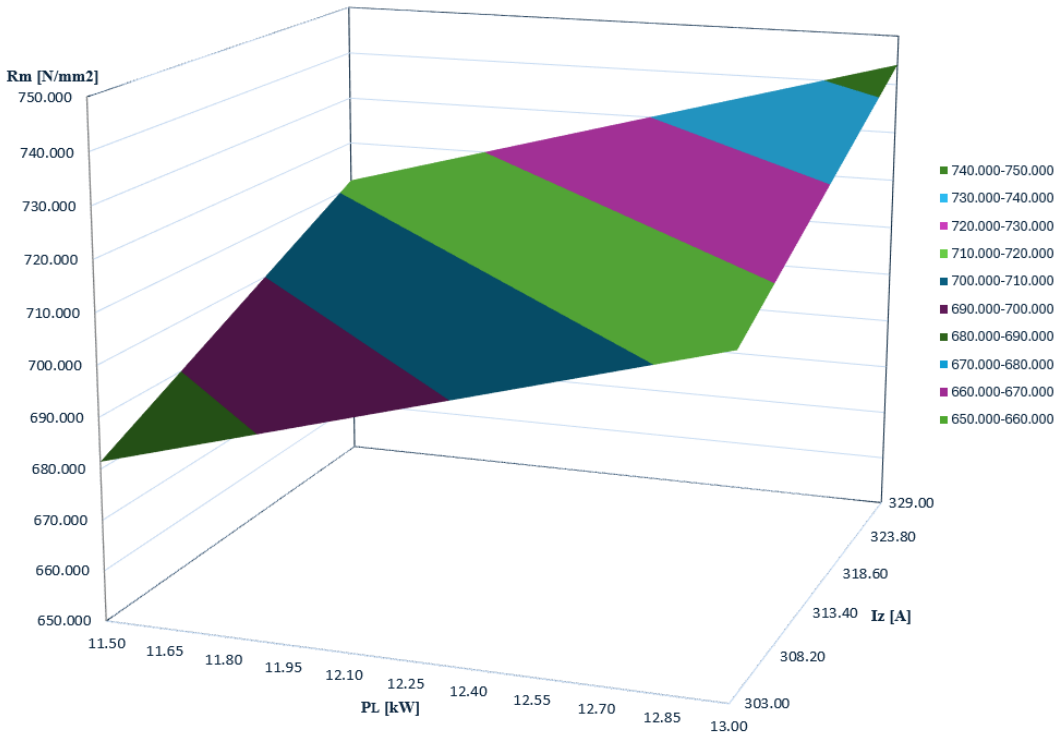
Слика 6.4. 2Д графички приказ на моделот при P_L(srd) = 12,2 (kW)



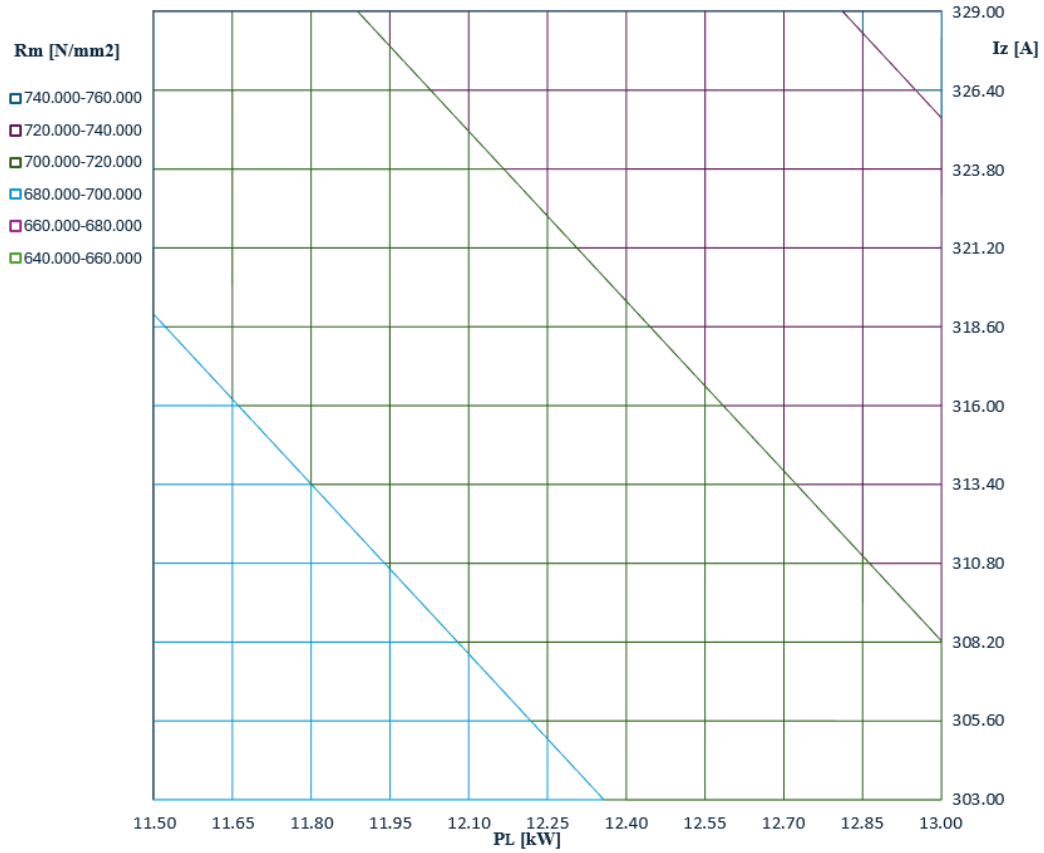
Слика 6.5. 3Д графички приказ на моделот при $P_L(max)$ = 13,0 (kW)



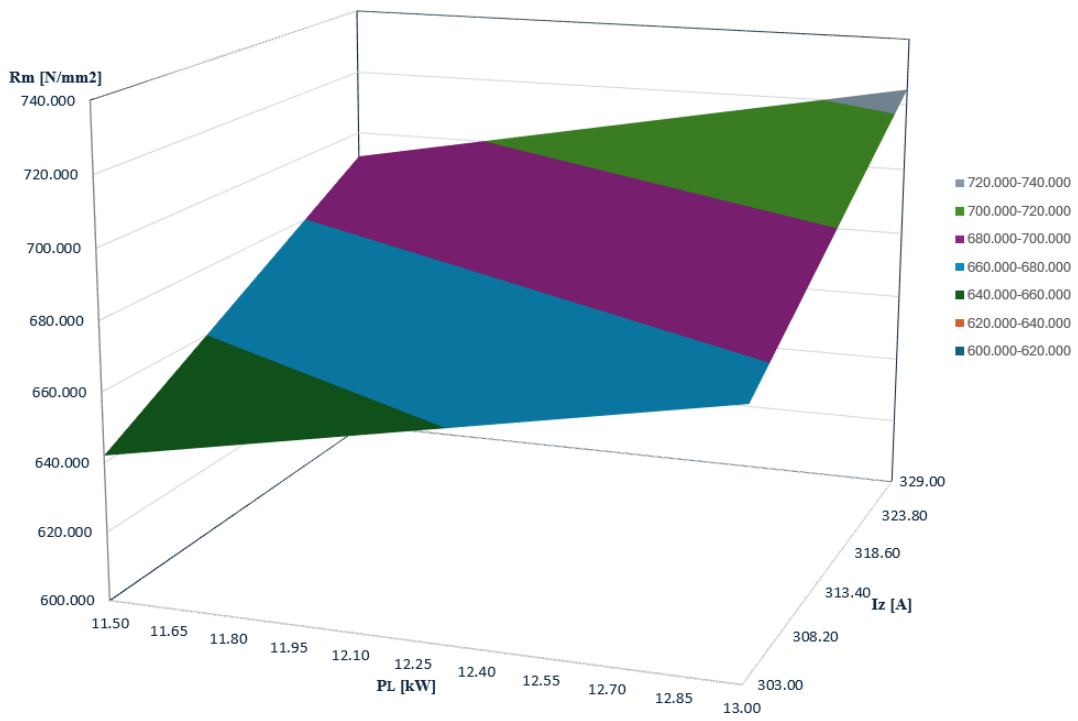
Слика 6.6. 2Д графички приказ на моделот при $P_L(max)$ = 13,0 (kW)



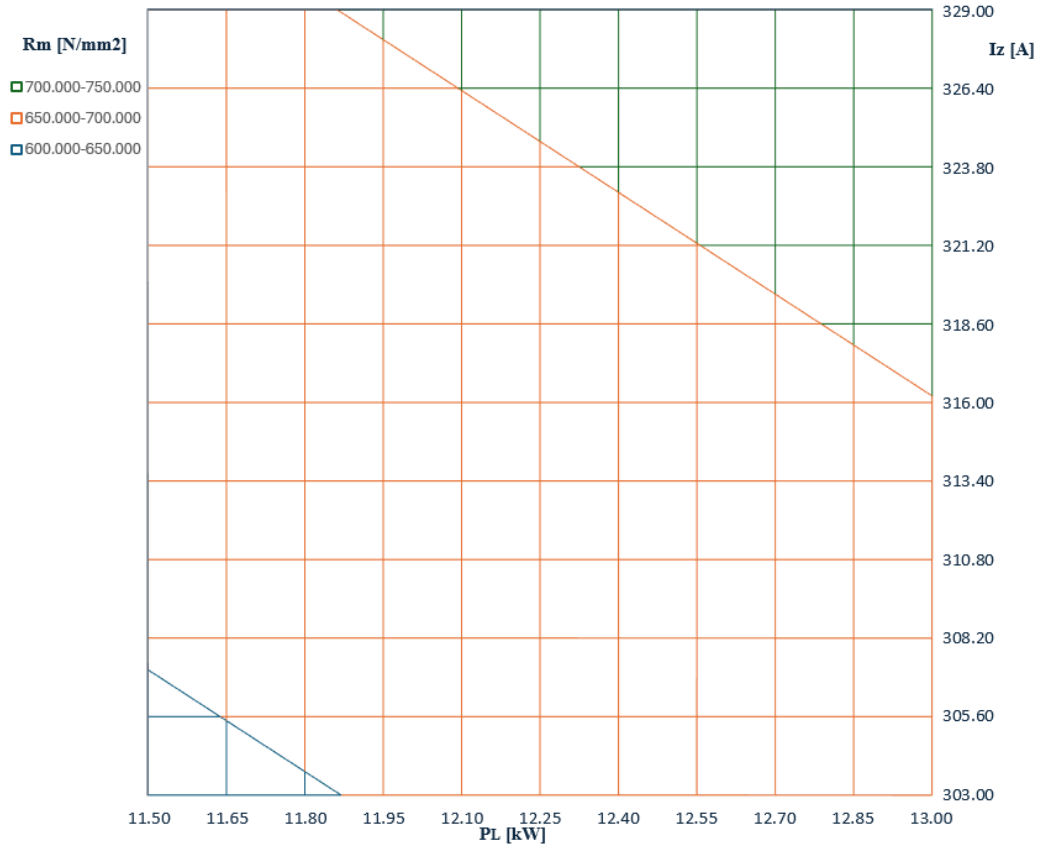
Слика 6.7. 3Д графички приказ на моделот при V_Z (min) = 1,8 (m/min)



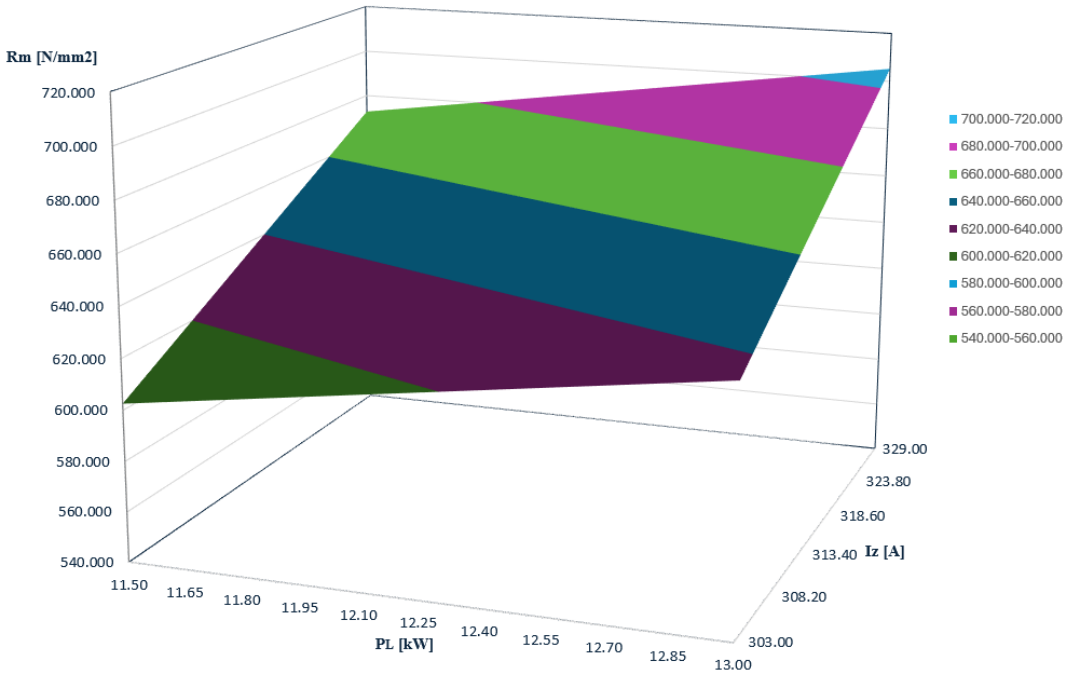
Слика 6.8. 2Д графички приказ на моделот при V_Z (min) = 1,8 (m/min)



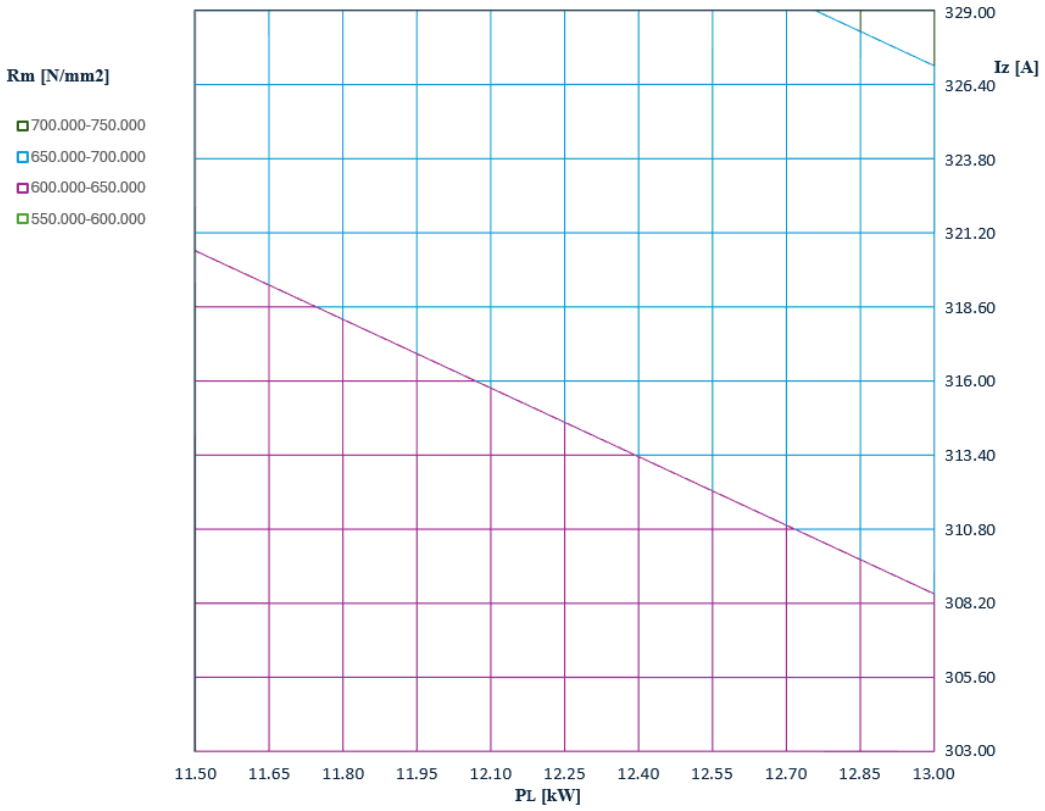
Слика 6.9. 3Д графички приказ на моделот при V_Z (srd) = 2,0 (m/min)



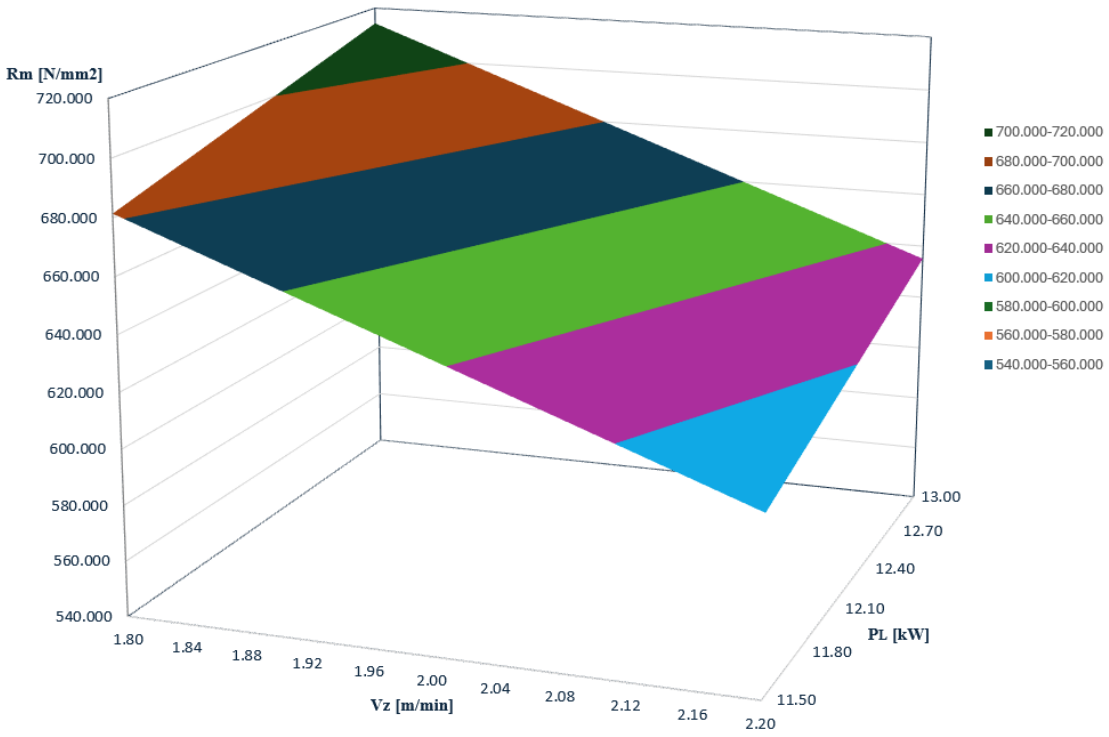
Слика 6.10. 2Д графички приказ на моделот при V_Z (srd) = 2.0 (m/min)



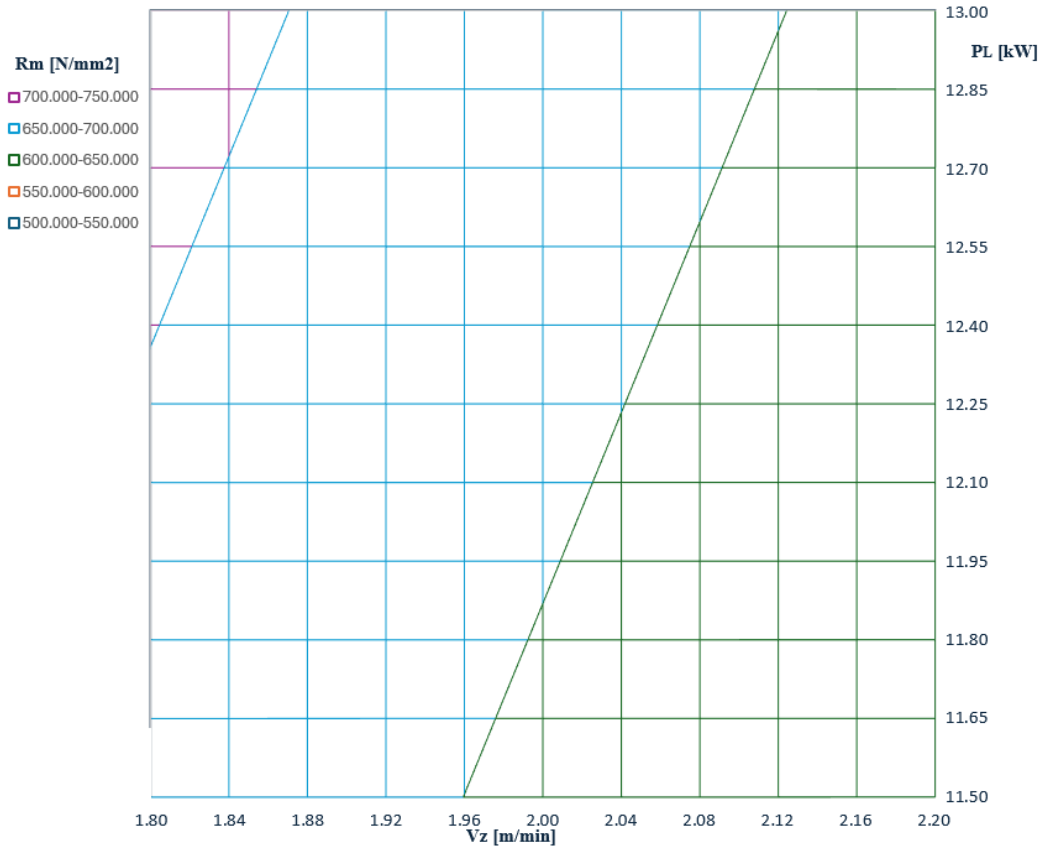
Слика 6.11. 3Д графички приказ на моделот при V_Z (max) = 2.2 (m/min)



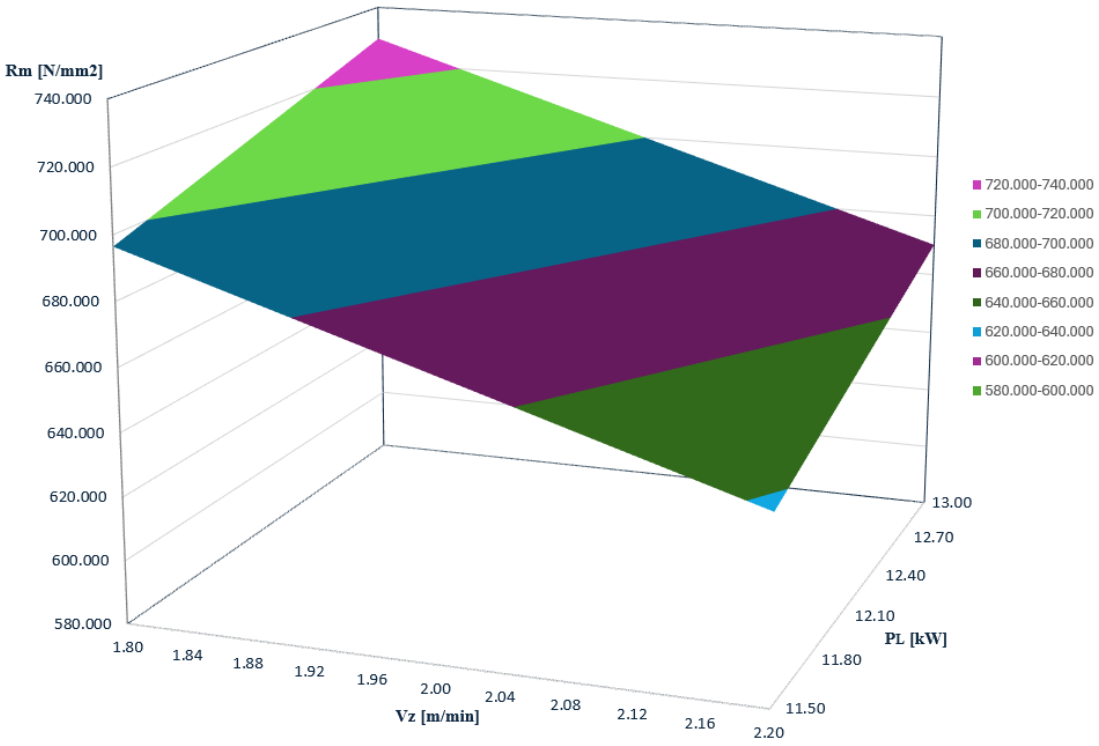
Слика 6.12. 2Д графички приказ на моделот при V_Z (max) = 2.2 (m/min)



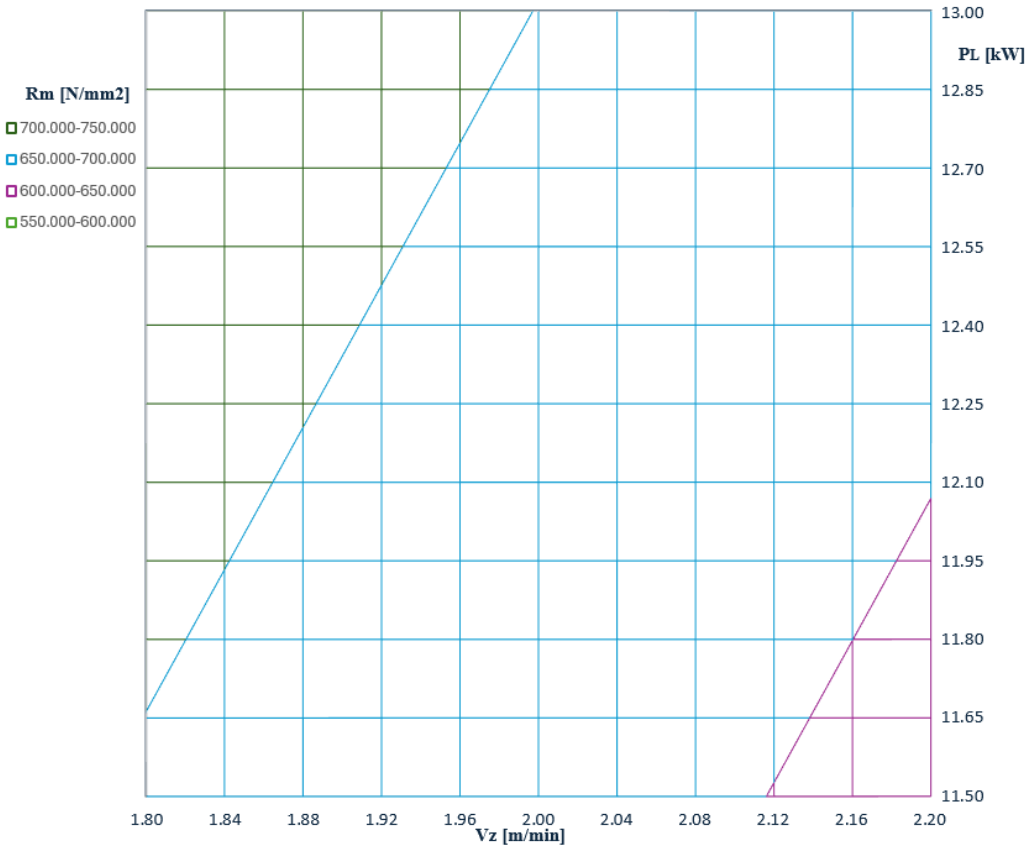
Слика 6.13. 3Д графички приказ на моделот при I_z (min) = 303 (A)



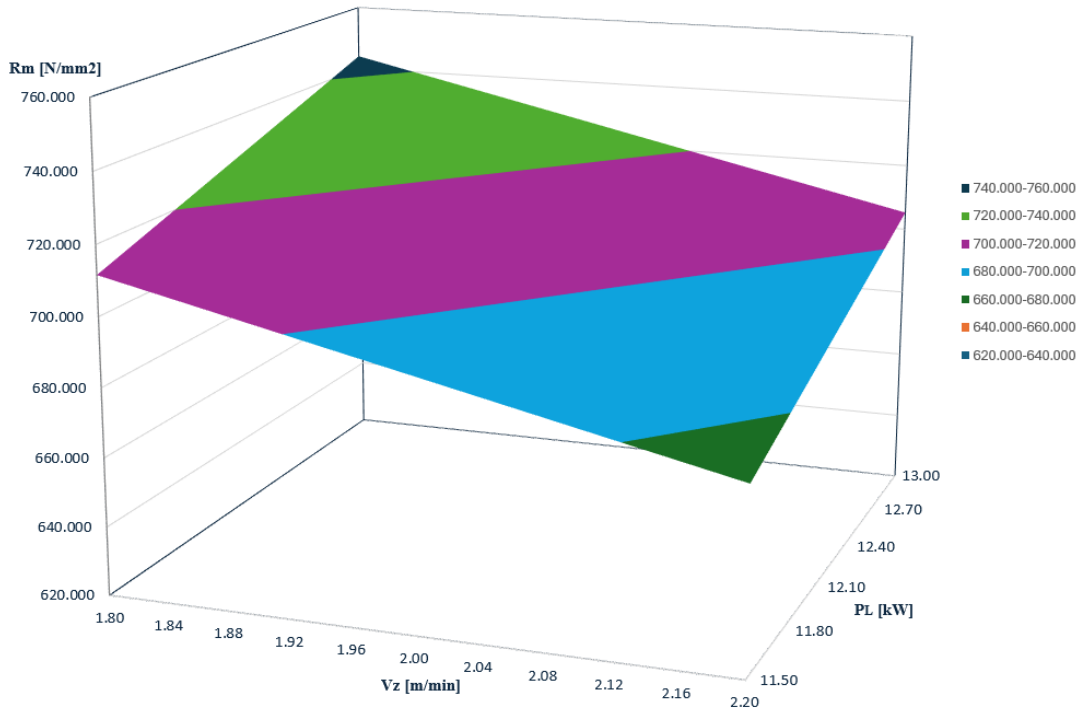
Слика 6.14. 2Д графички приказ на моделот при I_z (min) = 303 (A)



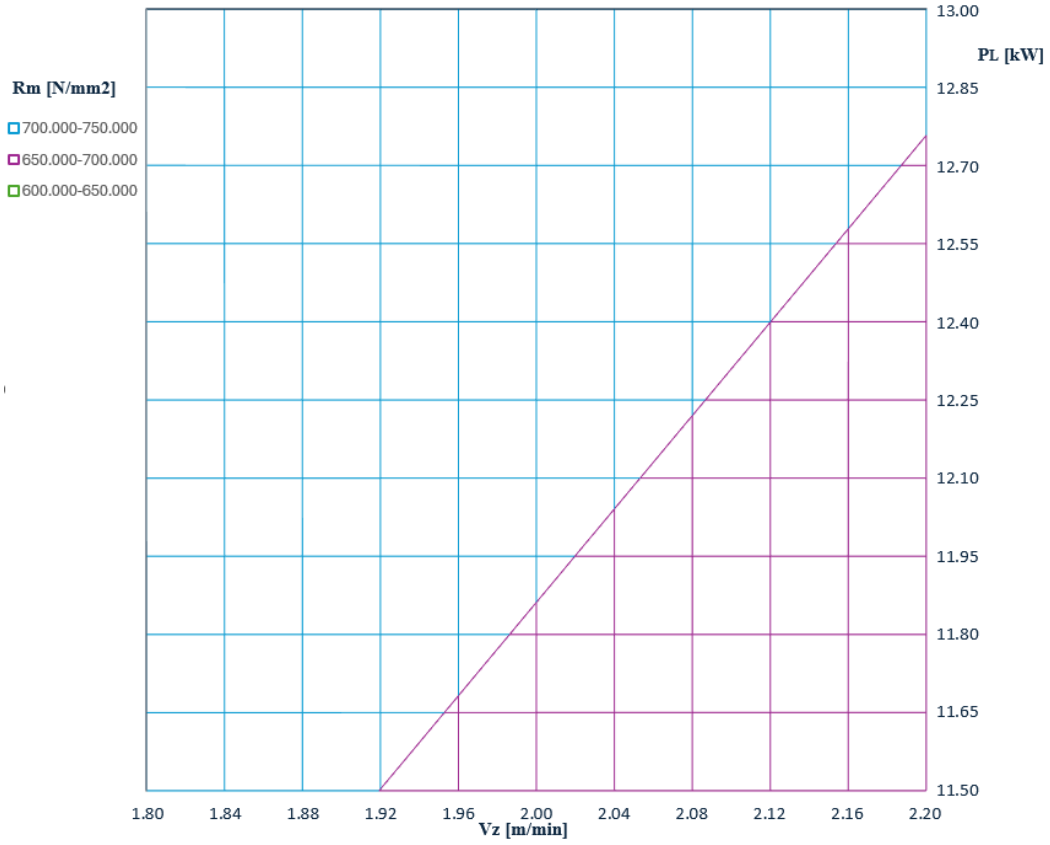
Слика 6.15. 3Д графички приказ на моделот при Iz (srd) = 316 (A)



Слика 6.16. 2Д графички приказ на моделот при Iz (srd) = 316 (A)



Слика 6.17. 3Д графички приказ на моделот при I_Z (max) = 329 (A)



Слика 6.18. 2Д графички приказ на моделот при I_Z (max) = 329 (A)

6.1.3. Анализа на добиените модели

Врз основа на добиената регресивна равенка со значајните променливи:

$$Fcr = 683{,}334 + 16{,}251X_1 - 29{,}419X_2 + 25{,}084X_3 + 10{,}001X_2X_3 \quad (6.12)$$

или во природни координати:

$$F = 2533{,}44 + 21{,}6683\ P_L - 1362{,}6360\ V_z - 5{,}7638\ I_z + 3{,}8467\ V_z\ I_z \quad (6.13)$$

определен е математички модел на зависност на затегнувачката јакост на хибридниот завар од независно променливите големини P_L, V_z и I_z.

Од равенката (6.12) може да се воочи посебното парцијално влијание на секој од независно променливите големини како и нивното заедничко влијание. Главните заклучоци од анализата се:

- Сите три независно променливи големини имаат значајно влијание врз независно променливата.
- Моќност на ласерскиот сноп P_L има умерено позитивно влијание, што укажува дека неговото зголемување доведува до зголемување на зависно променливата Rm, односно зголемување на затегнувачката јакост. За секоја единица на зголемување на моќноста на ласерскиот сноп, затегнувачката јакост би се зголемила за 16,25 (N/mm^2) под претпоставка дека останатите независно променливи остануваат константни.
- Брзина на заварување V_Z има најсилен ефект, а при тоа истот е негативен, односно нејзиното зголемување резултира со намалување на затегнувачката јакост Rm. За секоја единица на зголемување на брзината на заварување, затегнувачката јакост би се намалила за 29,42 (N/mm^2) под претпоставка дека останатите независно променливи остануваат константни или во експерименталниот простор од најниско ниво до највисоко ниво на промена доведува до намалување од 58,8 (N/mm^2).
- Јачина на струјата на заварување I_Z има позитивно влијание врз зависно променливата Rm и претставува втор највлијателен фактор во моделот. За секоја единица на зголемување на јачината на електричниот лак затегнувачката јакост би се зголемила за 25,08 (N/mm^2) под претпоставка дека останатите независно променливи остануваат константни.
- Интеракцискиот ефект помеѓу V_Z и I_Z е статистички значаен и истиот е позитивен. Ова укажува дека влијанието на V_Z врз резултатот не е константно, туку зависи од нивото на променливата I_Z. Конкретно, позитивниот интеракциски коефициент значи дека негативниот ефект на V_Z е ублажен кога I_Z е на високо ниво.
- Интеракциските ефекти помеѓу P_L V_Z, P_L I_Z и P_L V_Z I_Z не се статистички значајни на ниво на значајност $\alpha = 0{,}05$.
- Според моделот за да се постигнат високи вредности на зависно променливата Rm, се препорачува P_L I_Z да се одржуваат на највисоко ниво (+1), додека V_Z да се одржува на најниско ниво (-1). При оваа комбинација се постигнува највисока вредност на затегнувачката јакост од експерименталниот простор Rm=744 (N/mm^2). При најслабата комбинација P_L (-1), V_Z (+1), I_Z (-1) се добиваат најниски вредности на Rm=603 (N/mm^2). Следствено, разбирањето на интеракцијата помеѓу V_Z и I_Z е клучно

за контрола на процесот бидејќи најдобри резултати се добиваат кога ефектите на двете променливи се разгледуваат заедно.

6.2. Taguchi метод (ортогонални низи и S/N)

Анализа на експерименталните резултати е извршена со употреба на ортогонални низи по Taguchi метод со цел да се определи влијанието на независно променливите големини врз зависно променливата Rm, а при тоа користејќи помал број на експериментални истражувања т. е. комбинации. Ортогоналните низи овозможуваат серија од добро избалансирани (минимални) експерименти и Taguchi однос помеѓу влезниот сигнал и коефициент на шум односно нарушување, што се клучни функции на саканиот излез и служат како објективни функции за оптимизација. Тие помагаат во анализата на податоци и одредување на оптимални резултати. Примарната цел на Taguchi методот е да ги минимизира варијацијите на излезот иако во самиот процес е присутно нарушувањето [113].

Генерално, за оптимизирање на процесот влијаат неколку контролни фактори кои директно ја детерминираат целта, односно саканата вредност на излезот. За статистичка обработка, оптимизацијата вклучува утврдување на најдобар контролен фактор кој има најголемо влијание врз излезот да биде во саканата вредност [112, 113].

За исполнување на целта одбран е модел 3^3 каде што ортогоналната матрица е L9, три нивоа на трите независно променливи големини. Вкупно се дефинирани 9 комбинации од кои 3 се поклопуваат со комбинациите од ортогоналниот метод. Обработката на експериментално добиените резултати се врши по следниот алгоритам:

- Групирање на резултатите во согласност со комбинацијата од матрицата.
- Пресметување на средна вредност за секоја комбинација.
- Пресметување на односот Сигнал-на-Шум (S/N) за секоја комбинација според критериум „поголемото е подобро“.
- Анализа на просечниот S/N за секое ниво.
- Одредување на оптимални услови и фактор со најголемо влијание врз процесот.

6.2.1. Обработка на експериментално добиените резултати

Основна цел на Taguchi методот е да овозможи ефикасно оценување на влијанието на повеќе фактори врз резултатите од експериментот со минимален број на експериментални мерења, што е особено значајно за намалување на трошоците и времето. Попрецизно, преку обработка на експерименталните резултати да се определи која од независно променливите големини P_L, V_z и I_z има најголемо влијание врз зависно променливата Rm. Обработката е извршена со помош на сметач со програм MS Excel согласно претходно изнесениот алгоритам.

За поедноставна обработка на експерименталните резултати е извршено кодирање на независно променливите големини:

- Фактор А – моќност на ласерски сноп, P_L(kW): 11,5 – 13 (kW),
- Фактор В – брзина на заварување, V_z (m/min): 1,8 – 2,2 (m/min),
- Фактор С – јачина на струја на заварување I_z (A): 303 – 329 (A),

додека нивоата на промена се кодирани со следните ознаки:

- Ниво 1 – минимално ниво,
- Ниво 2 – средно ниво,
- Ниво 3 – максимално ниво.

За пресметка на S/N според критериум „поголемото е подобро“ се користи следната формула:

$$S/N = -10 \cdot \log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{y_i^2}\right) \tag{6.14}$$

каде што:

- y_i се резултати од мерења во експериментот,
- n е бројот на повторувања, односно n =3.

Во Табела 6.3 е даден пресметаниот S/N за секоја комбинација од експериментот.

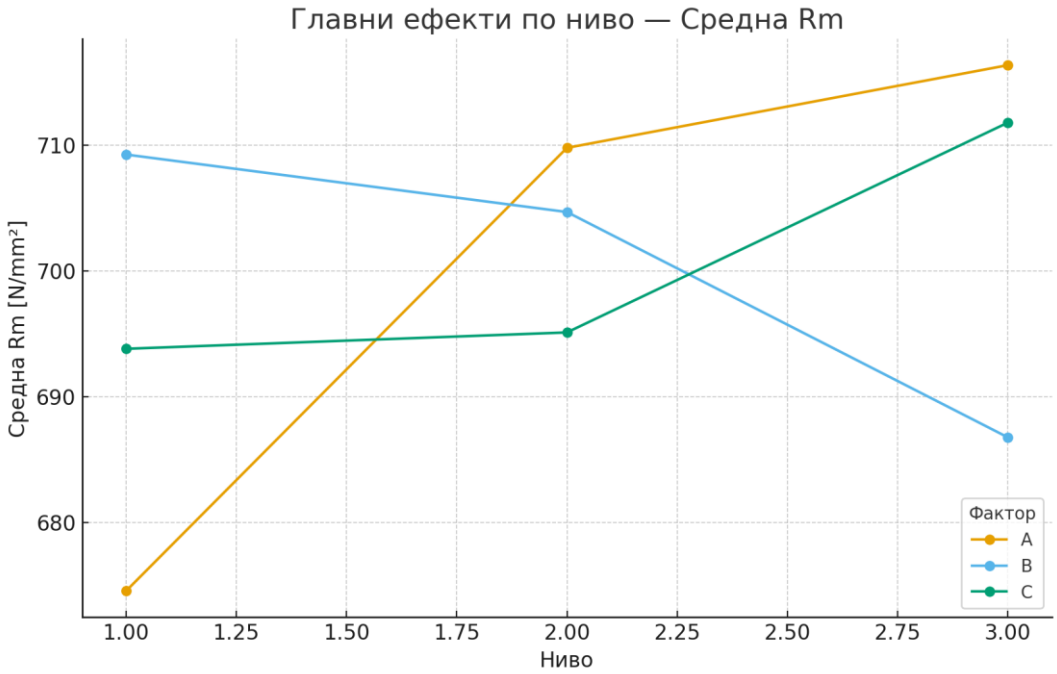
Табела 6.3. Кодирана матрица и измерени вредностси од планот со пресметан S/N

Број на експерименти	Коодирани вредности			Измерени вредности - Затегнувачка јакост Rm (N/mm^2)			Средна вредност Rm (N/mm^2)	S/N (dB)
	Фактор A	Фактор B	Фактор C					
1	1	1	1	688	679	675	680.7	56.67
2	1	2	2	664	695	662	673.7	56.57
3	1	3	3	676	671	661	669.3	56.51
4	2	1	2	751	702	678	710.3	57.01
5	2	2	3	718	731	739	729.3	57.26
6	2	3	1	679	708	682	689.7	56.77
7	3	1	3	736	730	744	736.7	57.35
8	3	2	1	725	722	686	711.0	57.03
9	3	3	2	681	703	720	701.3	56.92

За анализа на просечниот S/N на секое ниво е извршено групирање на вредностите на S/N според нивото на секој фактор A, B и C. Врз основа на ова групирање е пресметана најголемата разлика помеѓу максималната и минималната просечна S/N вредност за секој фактор, дадени во Табела 6.4, а соодветно прикажани на графичкиот приказ даден на слика 6.19.

Табела 6.4. Пресметани просечни S/N вредности по ниво

	Ниво 1 (dB)	Ниво 2 (dB)	Ниво 3 (dB)	Разлика min-max (dB)
A	56.58	57.01	57.1	0.52
B	57.01	56.95	56.73	0.28
C	56.82	56.83	57.04	0.22



Слика 6.19. Графички приказ на влијание на факторите врз затегнувачката јакост

6.2.2. Анализа на просечните S/N вредности

Според пресметаните просечни S/N вредности по ниво за секој фактор A, B и C, и најголемата пресметана разлика помеѓу максималната и минималната просечна S/N вредност за секој фактор изведени се следните заклучоци:

- Оптималните нивоа на фактори, односно оптималната комбинација за постигнување на најголемо влијание врз променливата е: A3 – B1 – C3, каде што Фактор A – ниво 3 (57,1), Фактор B – ниво 1 (57,01) и Фактор C – ниво 3 (57,04).
- Анализата на разликата помеѓу максималните и минималните вредности покажуваат дека факторот A е највлијателен врз променливата. Со разлика од 0,52 (dB) овој фактор има најголемо влијание во споредба со факторите B и C кои имаат разлики од 0,28 (dB) и 0,22 (dB).
- Анализата на резултатите покажува дека сите фактори се статистички значајни, односно независно променливите големини P_L и I_Z имаат позитивно влијание врз зависно променливата Rm, додека V_Z има негативно влијание врз Rm.
- Рангирањето на влијанијата на независно променливите големини врз зависно променливата Rm е со следниот редослед: P_L има најголемо влијание, потоа следи V_Z и најмало влијание има I_Z.
- Генерално, за да се постигне најдобра оптимизација на процесот, главниот фокус потребно е да биде врз моќноста на ласерскиот сноп P_L, додека брзината на заварување V_Z и јачината на струјата на заварување I_Z потребно е да се прилагодат на нивните оптимални нивоа за да се добие максимлани вредности на затегнувачката јакост Rm.

7. Техно-економска анализа на хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак

Заварувачките процеси се избираат и применуваат врз основа на комбинација од технички и економски критериуми. Иако техничките параметри, како што се механички карактеристики на заварот, продуктивност и квалитет играат клучна улога, економската исплатливост често е пресуден фактор. Заварувачки процес кој не се оправдува од економски аспект ретко се имплементира и одржува во практиката. Со други зборови, секое техничко решение мора да има јасна економска логика за негова примена. Според Американското здружение за заварување [125], голем број производителите на челични конструкции немаат доволно разбирање за трошоците на производство, особено за оние кои произлегуваат од заварувачките процеси. Од друга страна, истражувањата потврдуваат дека производители кои имаа целосно разбирање за трошоците за заварување, успеваат да произведат челични конструкции со поголема додадена вредност, преку имплементација на современи технологии за заварување и на тој начин успешно да се позиционираат на домашниот и глобалниот пазар [126]. Дополнително, разбирањето на факторите кои влијаат врз трошоците за заварување им овозможува на производителите да се насочат кон промени кои ги намалуваат севкупните трошоци на производството, што директно ја зголемува нивната конкурентност.

Хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак претставува релативно нов процес кој се уште е ретко применуван во индустриската практика, главно поради високите иницијални трошоци за имплементација. Дополнително, процесот бара и значајни вложувања во обука на оператори како и примена на строги безбедносни мерки што дополнително го зголемува финансиското оптоварување во споредба со конвенционалните процеси на заварување. Од друга страна, истиот се карактеризира со големи брзини на заварување, ниско ниво на внесување на топлина и големи длабочини на пенетрација што претставува одлична можност за заварување на конструктивен челик со дебелина > 10 (mm) во еден премин. Токму поради овие карактеристики, хибридното заварување се јавува како ветувачки процес кој може да доведе до намалување на севкупните трошоци за заварување, особено при сериско и масовно производство.

Следствено, во истражување на оваа докторска дисертација покрај техничка оправданост на хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак извршена е економска анализа во споредба со конвенционалниот MIG процес на заварување. Целта е да се утврди дали хибридниот процес може да обезбеди пониски трошоци и подобра ефикасност при реално индустриско производство.

За целите на анализата е користен стандарден производ од инженерската практика, челична цевка (оплата) за изработка на бетонски столбови. Генерално, овие челични цевки се изработуваат од конструктивен челик S235JR или S355JR со дијаметар од 600, 800, 1.000 и 1.200 (mm), стандардна должина од 2.000 (mm) и дебелина од 12 (mm). Овој челичен елемент е избран за анализа од повеќе причини. Првенствено, поради тоа што се произведува во големи серии,

а истовремено неговата дебелина е идентична со дебелината на конструктивниот челик кој се користи во експерименталното истражување со што се обезбедува репрезентативност и применливост на резултатите.

За економска анализа е применет методот на трошоци по единица должина на завар и истата е извршена за единечно производство и сериско производство од 1.000 парчиња со што се овозможува да се согледа економскиот ефект од повторливост и економија од обем.

Вкупните трошоци на заварување (C_T) се пресметани како збир од трошоците за подготовка на елементите за заварување (C_P), трошоците при процесот на заварување (C_W) и трошоците созададени по процесот на заварување (C_{PP}).

$$C_T = C_P + C_W + C_{PP} \tag{7.1}$$

Табела 7.1. Вкупни трошоци за подготовка на елементите за заварување (C_P)

Ред. бр.	Материјал	Дебелина (mm)	Подготовка на рабови	Парчиња	Должина на машинска обработка (m)	Време за машинска обработка (m/min)	Должина на сечење (m)	Време за сечење на ЦНЦ плазма (m/min)	Време за поз. на ЦНЦ глодалка (min/par)	Време за поз. на ЦНЦ плазма (min/par)	Време на започнување и промена (min/par)	Работен час на ЦНЦ глодалка (eur/h)	Работен час на ЦНЦ плазма (eur/h)	Вкупно трошоци (eur/par)	Вкупно трошоци (eur/m)
1	S355J2	12.00	I - 0◦	1	4.00	0.27	7.80	0.15	4	3	3	55	45	63.50	**31.75**
2	S355J2	12.00	I - 0◦	1000	4,000.00	0.27	7,800.00	0.15	2	1.5	1	55	45	57.21	**28.60**
3	S355J2	12.00	V - 60◦	1	4.00	0.18	7.80	0.15	4	3	3	55	45	70.29	**35.14**
4	S355J2	12.00	V - 60◦	1000	4,000.00	0.18	7,800.00	0.15	2	1.5	1	55	45	64.00	**32.00**

Трошоците за подготовка на елементите за заварување (C_P) ги опфаќаат трошоците за сечење на CNC плазма и трошоците за машинска обработка, глодање за порамнување и подготовка на рабовите за заварување, како и отстранување на зоната под влијание на топлина појавена во процесот на сечење, дадени во Табела 7.1.

Табела 7.2. Вкупни трошоци при процесот на заварување (C_W)

Ред. бр.	Процес на заварување	Материјал	Дебелина (mm)	Подготовка на рабови	Парчиња	Премини	Параметри на заварување				Трошоци на опрема и работна сила (eur/h)	Вкупна ел. енергија (kW)	Додаден материјал (kg/h)	Заштитен гас (l/min)	Должина на заварување (m)	Време на позиционирање (min/par)	Време за точкести завари (min/par)	Вкупно трошоци (eur/par)	Вкупно трошоци (eur/m)
							PL (kW)	Vz (m/min)	Iz (A)	Uz (V)									
1	HLAW	S355J2	12.00	I - 0◦	1	1	11.5	2.20	303	32.3	57.71	21.29	11.00	25.00	2.00	5	1	8.69	**4.34**
2	HLAW	S355J2	12.00	I - 0◦	1000	1	11.5	2.20	303	32.3	57.71	21.29	11.00	25.00	2000.00	3	0.5	6.12	**3.06**
3	MIG	S355J2	12.00	V - 60◦	1	1		0.20	100	18	21.37	1.80	1.50	10.00	2.00	1.65	0.3	11.66	**5.83**
						2		0.28	230	26	21.37	5.98	3.50	12.00	2.00	1.65	0.3	9.95	**4.98**
						3		0.30	250	27	21.37	6.75	3.80	12.00	2.00	1.65	0.3	9.40	**4.70**
4	MIG	S355J2	12.00	V - 60◦	1000	1		0.20	100	18	21.37	1.80	1.50	10.00	2000.00	1.0	0.2	11.34	**5.67**
						2		0.28	230	26	21.37	5.98	3.50	12.00	2000.00	1.0	0.2	9.69	**4.84**
						3		0.30	250	27	21.37	6.75	3.80	12.00	2000.00	1.0	0.2	9.13	**4.57**

Трошоците при процесот на заварување (C_W) се пресметани врз основа на трошоците поврзани со набавка на опрема, потрошен материјал (заштитен гас, додатен материјал и енергија) и трошоци за работна сила. Пресметката е извршена за двата анализирани заварувачки процеси, хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак и конвенционалното MIG заварување, прикажани во Табела 7.2. Методот на пресметка е флексибилен и може да се примени и за други заварувачки процеси под услов претходно да се направи соодветно подесување на влезните параметри карактеристични за процесот.

Трошоците за набавка на заштитен гас, додатен материјал и електрична енергија се фиксни и идентични за двата процеси на заварување и нивните вредности се:

- Цена на чинење на заштитен гас (Gp): 0,07 (eur/l).
- Цена на чинење на додатен материјал (Gd): 1,4 (eur/kg).
- Цена на чинење на електрична енергија (Ge): 0,184 (eur/kWh).

Табела 7.3. Вкупни трошоци за опрема и работна сила за HLAW и MIG заварување

Ред. бр.	Опис	Хибродно заварување HLAW	MIG заварување
1	Уред за заварување - МИГ	€ 20,000.00	€ 20,000.00
2	Ласер за заварување - fiber 20kW	€ 350,000.00	/
3	Роботска станица за заварување	€ 70,000.00	€ 40,000.00
4	Опрема за позиционирање	€ 35,000.00	€ 35,000.00
5	Трошоци за инсталација	€ 30,000.00	€ 8,000.00
6	Преостаната опрема за површување и заштита	€ 50,000.00	€ 10,000.00
	Вкупни трошоци за инсталација	**€ 555,000.00**	**€ 113,000.00**
7	Годишна амортизација	€ 79,285.71	€ 22,600.00
8	Период на амортизација (години)	7	5
9	Вредност по амортизација	€ 30,000.00	€ 8,000.00
10	Работни часа/година	1760	1760
	Трошоци за опрема [eur/hn]	**€ 42.61**	**€ 11.93**
11	Месечни работни часови	160	160
12	Бруто трошок за плата (нето x 1.51)	€ 2,416.00	1510
	Трошоци за работна сила [eur/hn]	**€ 15.10**	**€ 9.44**
	Вкупни трошоци [eur/hn]	**€ 57.71**	**€ 21.37**

Табела 7.4. Вкупни трошоци по процесот на заварување (C_{PP})

Ред. бр.	Процес на заварување	Материјал	Дебелина (mm)	Парчиња	Термичка обработка (eur/par)	Трошок за работна сила (eur/h)	Вкупно работни часови (h/par)	Вкупно трошоци (eur/par)	Вкупно трошоци (eur/m)
1	HLAW	S355J2	12.00	1	100.00	10.00	0.25	102.50	**51.25**
2	HLAW	S355J2	12.00	1000	25.00	10.00	0.25	27.50	**13.75**
3	MIG	S355J2	12.00	1	100.00	10.00	1.00	110.00	**55.00**
4	MIG	S355J2	12.00	1000	25.00	10.00	1.00	35.00	**17.50**

Трошоците создадени по процесот на заварување (C_{PP}) ги опфаќаат трошоците за дополнителна работа, исправка на деформации кои се јавуваат како последица на термичкото оптоварување при процесот на заварување, дадени во Табела 7.4. Големината на овие трошоци зависи од количеството на внесена топлина по единица должина на заварот и редоследот на заварување. Дополнително, во оваа група на трошоци припаѓаат и трошоците за термичката обработка послем процесот на заварување. Термичката обработка може да се изведува по

барање на нарачател, но во одредени случаи е задолжителна, особено кога заварот е подложен на динамички оптоварувања и кога експлоатационите стандарди налагаат нејзино спроведување. Вообичаено, трошоците за исправање на деформации и термичка обработка се условени од формата и големината на заваруваниот дел. Поради нивната сложеност овие трошоци се тешко предвидливи и пресметливи и затоа голем број истражувачи вообичаено ги изоставуваат од своите анализи и пресметки [126].

Кај единечното производство, вкупните трошоци за заварување при хибридното заварување изнесуваат 87,34 (eur/m), додека кај MIG заварувањето изнесуваат 105.65 (eur/m), што е намалување од 20,96 (%). Послем процесот на заварување термичката обработка не е задолжителна и доколку се исклучат нејзините трошоци, вкупните трошоци би се намалиле на 37,34 (eur/m) при HLAW, односно на 55,65 (eur/m) при MIG заварувањето, покажувајќи поголема економска оправданост на HLAW со намалување од 49,03 (%). Овие резултати јасно покажуваат дека и покрај високите иницијални трошоци за набавка на опрема, хибридното заварување обезбедува заштеда од 18 до 20 (eur/m) во споредба со MIG заварувањето при единечно производство на завари со должина поголема од 1 (m). Заштедите по единица должина би биле уште поголеми доколку се користи за долги лински завари како што се заварите кај носачите во бродоградбената индустрија и заварите на челичните столбови и греди во металопреработувачката индустрија.

При сериско производство од 1000 парчиња, разликата во трошоците по единица должина на заварот помеѓу двата процеси уште повеќе се зголемува во корист на хибридното заварување, односно изразено во проценти разликата е 58,24 (%). Главната причина за пониските трошоци кај хибридното заварување е значително намалување на оперативните трошоци послем процесот на заварување и високата ефикасност при изведба. Доколку се направи споредба помеѓу трошоците при процесот на заварување (Cw) ќе се забележи значаен скок кај MIG заварувањето од 3,5 пати повеќе при единечно и 5 пати повеќе при сериско производство. Оваа разлика е поради изведбата на хибридниот завар во еден премин и користењето на големи брзини на заварување. Дополнителна потврда дека хибридното заварување е најкорисно за сериско производство се изразува во споредба на трошоците при процесот на заварување (Cw) за единечно и сериско производство, односно нивното намалување од 4,34 (eur/m) на 3,06 (eur/m).

Табела 7.5. Вкупни трошоци за заварување (C_T)

Ред. бр.	Процес на заварување	Материјал	Дебелина (mm)	Парчиња	Вк. трошоци за подготовка - Cp (eur/m)	Вк. трошоци при процесот на заварување Cw (eur/m)	Вк. трошоци по процесот на заварување Cpp (eur/m)	Вк. трошоци по процесот на заварување без термичка обр. Cpp (eur/m)	Вк. трошоци за заварување Cт (eur/m)	Вк. трошоци за заварување без термичка обр. Cт (eur/m)
1	HLAW	S355J2	12.00	1	31.75	4.34	51.25	1.25	87.34	**37.34**
2	HLAW	S355J2	12.00	1000	28.60	3.06	13.75	1.25	45.41	**32.91**
3	MIG	S355J2	12.00	1	35.14	15.51	55.00	5.00	105.65	**55.65**
4	MIG	S355J2	12.00	1000	32.00	15.08	17.50	5.00	64.58	**52.08**

Од извршената економска анализа може да се заклучи дека хибридното заварување е економски оправдан избор при сериско и долгорочно производство, каде што доаѓаат до израз ефектите на економија од обем и значително намалување на оперативните трошоци. Од друга страна, MIG заварувањето останува соодветна опција за единечно производство и помали серии, каде што пониските капитални вложувања и едноставната примена имаат поголемо значење од оперативната ефикасност.

8. Заклучок

Хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак (HLAW) е процес кој успешно ги комбинира предностите на заварувањето со ласерски сноп и заварувањето со топлива електродна жица под заштитен гас, што резултира во процес со големи брзини на заварување, минимален внес на топлина и голема длабочина на пенетрација. Покрај овие значајни предности неговата имплементација во индустријата е ограничена поради високите почетни трошоци, дополнителните безбедносни мерки и комплексноста поради големиот број на параметри, односно самиот процес е иновативен и сеуште недоволно истражен.

Резултатите од оваа истражување посочуваат дека и покрај големиот број на параметри, моќноста на ласерскиот сноп, брзината на заварување и јачината на струјата на заварување се клучни параметри кои директно влијаат на квалитетот и механичките карактеристики на заварот. Следствено, врз основа на теоретското и експерименталното истражување во оваа докторска дисертација како и извршената анализа на резултатите со помош на повеќефакторниот експеримент може да се извлечат неколку заклучоци од технички и економски аспект:

- Хибридното заварување обезбедува највисок квалитет во Класа B според стандардот ISO 12932 од аспект на визуелна конторла. Иако најчесто се појавуваат површински несовршености, истите се во рамките на гранични вредности и се во зависност од јачината на струјата на заварување и брзината на заварување.

- Хибридните завари имаат стандарден облик со зголемена ширина и висина во горна зона, а во долната зона е потесен со паралелни страни. Зголемената количина на внесена енергија по единица должина на заварот позитивно влијае врз пенетрацијата во горната зона, но негативно во долната зона поради енергетската прераспределба што е клучно за балансирање на хибирдниот процес.

- Хибридните завари поседуваат одлични механички карактеристики кои се во функција од погонската енергија (Qp). Затегнувачката јакост (Rm) е поголема од онаа на основниот материјал за минимум 15 (%) при што има позитивна линеарна зависност со погонската енергија (Qp). Технолошката способност за деформабилност од кореновата страна е одлична, а од страна на лицето е намалена и бара оптимизација на јачина на струјата и брзина на заварување. Жилавоста на заварите зависи од внесената енергија (Qp) во зона на електричниот лак. Таа е стабилна поради влијанието на додатниот материјал, додека во зоната на ласерскиот сноп е покритична. Оптимални резултати се постигнуваат со внес на енергија од 0,6 до 0,8 (kJ/mm²). Тврдината е обратно пропорционална од жилавоста и е во директна зависност од брзината на заварување. Највисоки вредности се постигнати во зоната под влијание на топлина каде што дејствува електричниот лак и во металот на заварот во зоната на ласерскиот сноп. За добивање на оптимални резултати, потребно е да се користат намалени брзини на заварување или да се примени минимално предгревање.

- Соодветната микроструктура кај хибридните завари зависи од брзината на ладење, која е директно условена од параметрите на заварување. Поголемиот внес на топлина и помалата брзина на заварување ја намалуваат брзината на ладење со што се промовира формирање на поповолни структури, како што се игличест ферит и баинит наместо кршлив мартензит. Иако зоната на ласерскиот сноп и зоната на фузија се поподложни на неповолни структурни промени, тие сепак можат да се оптимизираат со правилен избор на параметрите на заварување. Со тоа се потврдува дека хибридното заварување овозможува добивање на завари со прифатливи металуршки карактеристики дури и без дополнителни постапки како предгревање или жарење по процесот на заварување.

- Според економската анализа, хибридното заварување е економски оправдано за долги линиски завари и покрај повисоките почетни трошоци за набавка на опрема. Оваа исплатливост е најизразена при сериско производство каде што се постигнуваат значителни заштеди поради економија од обем и високата оперативна ефикасност. Трошоците при процесот на заварување се намалуваат за 5 пати при сериско производство. Во споредба со MIG заварувањето, HLAW заварување не се препорачува за единечно производство и мали серии.

Генерално, конструктивен челик во квалитет S355J2 со дебелина поголема од 10 (mm) може успешно да се завари со хибридно заварување со ласерски сноп и електричен лак. Добиениот хибриден завар поседува одлични механички карактеристики кои директно зависат од количеството на внесена енергија по единица должина на заварот, односно зависат од моќноста на ласерскиот сноп, брзината на заварување и јачината на струјата на заварување.

Математичките модели покажуваат дека трите параметри значајно влијаат врз механичките карактеристики, особено врз затегнувачката јакост. Моќноста на ласерскиот сноп и јачината на струјата на заварување влијаат позитивно, за разлика од брзината на заварување која има негативно влијание. Негативниот ефект од брзината на заварување може да се намали преку позитивниот интеракциски ефект со јачината на струјата на заварување. За постигнување на оптимални резултати, се препорачува моќноста на ласерскиот сноп и јачината на струјата на заварување да се одржуваат на највисоко ниво, додека брзината на заварување да биде на најниско ниво. Иако ваквото подесување на параметрите доведува до оптимални резултати, истото има и одредени недостатоци, поради тоа е потребно континуирано истражување на парамерите на хибридното заварување за да се постигнат посакуваните резултати.

Моќноста на ласерскиот сноп (P_L) е главен параметар од кој зависи длабочината на пенетрација кај целокупниот хибриден завар. Истражувањето потврдува директна корелација помеѓу зголемената моќност и длабочината на пенетрација која е предуслов за постигнување повисока затегнувачка јакост при заварување на подебели елементи. Сепак, прекумерно зголемување на моќноста на ласерскиот сноп може да предизвика дефекти, како што се прокапини и порозност од кореновата страна и при тоа намалување на затегнувачката јакост поради концентрација на напони. Следствено, оптимална ласерска моќност е потребна да би се обезбедила длабока пенетрација и високи механички карактеристики на заварот.

Брзината на заварување (Vz) е клучен параметар кој е обратно пропорционален на внесената енергија по единица должина на заварот и при тоа директно влијае врз механичките карактеристики на заварот. Иако големата брзина на заварување е основна предност на хибридното заварување за зголемување на продуктивноста, истата потребно е да биде ограничена. Големите брзини на заварување предизвикуваат нестабилност на процесот, намалена длабочина на пенетрација, недоволно растопување на рабовите и формирање на покрта микроструктура поради забрзано ладење. Овие појави негативно се одразуваат врз механичките карактеристики на заварот. Резултатите од истражувањето укажуваат на потреба од балансирање помеѓу брзината на заварување и продуктивноста, со цел да се постигне ситнозрнеста структура и зголемена затегнувачка јакост.

Јачината на струјата на заварување (I_Z) е клучен параметар од кој зависи стабилноста и ефикасноста на процесот како и формата на заварот. Со зголемување на јачината на струјата се зголемува растопената маса и внесената енергија по единица должина која помага да се намалат дефектите и прошират толеранциите за изработка на жлебовите за заварување. Сепак, превисоки вредности на струјата за заварување може да предизвика привремени поткопувања, кои претставуваат иницијално место за развој на пукнатини при оптоварувања. Истражувањата укажуваат дека јачината на струјата на заварување треба да биде усогласена со брзината на заварување за да се намалат негативните ефекти од големите брзини на заварување и да се обезбеди стабилен процес.

Ова истражување претставува солидна основа за понатамошни истражувања во областа на хибридното заварување со ласерски сноп и електричен лак на конструктивен челик. Предлог насоки за понатамошни истражувања би можеле да бидат следните:

- Оптимизирање на HLAW процесот со користење на машинско учење и алатки за вештачка интелигенција.
- Влијание на енергетско ефикасните термички обработки врз механичките карактеристики на заварот.
- Развој на модели со вештачка интелигенција за рано предупредување и спречување на појава на дефекти.
- Комбинирање на процесите на хибридно заварување со ласерски сноп и адитивно производство.
- Прилагодување на микроструктурата на хибридните завари за подобрување на отпорност на замор, корозија и ползење.

Користена литература

[1] Agrawal B.P. and Kumar R. (2016) Challenges in application of pulse current gas metal arc welding process for preparation of weld joint with superior quality. Int J Eng Res Technol, (5), p.319–327.

[2] Pal K. and Pal S.K. (2011) Effect of pulse parameters on weld quality in pulsed gas metal arc welding: a review. *J. Mater. Eng. Perform.*, (20), p.918–931.

[3] Petring D. (2013) Developments in hybridization and combined laser beam welding technologies. In: S Katayama (ed.) Handbook of laser welding technologies. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Cambridge: Woodhead Publishing, p.478–504.

[4] Wallerstein D., Vaamonde E., Prada A., at al. (2020) Influence of welding gases and filler metals on hybrid laser- GMAW and Laser-FCAW welds. *Mechanical Engineering Science 0(0),* p.3-14.

[5] Nguyen T.C, Weckman D.C and Johnson D.A. (2007) The discontinuous weld bead defect in high-speed gas metal arc welds. *Weld J.*, (86), p.360–372.

[6] Piekarska W., Kubiak M., Bokota A. (2011) Numerical simulation of thermal phenomena and phase transformations in laser-arc hybrid welded joints. *Archives of metallurgy and materials,* (56), p.409-421.

[7] Bunaziv I., Dørum C., Nielsen S.E., at al. (2020) Laser-arc hybrid welding of 12- and 15-mm thick structural steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* (107), p.2649-2669.

[8] Moore P.L, Howse D.S and Wallach E.R. (2004) Microstructures and properties of laser/arc hybrid welds and autogenous laser welds in pipeline steels. *Sci. Technol. Weld Join*, (9), p.314–322.

[9] Le Guen E., Fabbro R., Carin M., et al. (2011) Analysis of hybrid Nd:Yag laser-MAG arc welding processes. *Opt. Laser Technol,* (43), p.1155–1166.

[10] Liu S., Liu F., Zhang H., et al. (2012) Analysis of droplet transfer mode and forming process of weld bead in CO_2 laser MAG hybrid welding process. *Opt. Laser Technol*, (44), p.1019–1025.

[11] Blecher J.J., Palmer T., DebRoy T. (2015) Mitigation of root defect in laser and hybrid laser-arc welding. Weld J., (94), p.73–82

[12] Pan Q., Mizutani M., Kawahito Y., Katayama S. (2016) Effect of shielding gas on laser–MAG arc hybrid welding results of thick high-tensile-strength steel plates. *Weld World* 60(4), p.653–664.

[13] Steen W. M, Eboo M., Clarke J. (1978) Arc augmented laser welding. *The 4th International Conference on Advances in Welding Processes* (1), p.257-265.

[14] Ready J.F (1997) Industrial Applications of Lasers. 2nd edition. London: Academic press.

[15] Seyffarth P., Krivtsun I.V. (2002) Laser-arc processes and their applications in welding and material treatment. London: Taylor & Francis.

[16] Finke B.R., Stern F., Decker I. (1991) Auswirkungen eines unterstьtzenden Laserstrahls auf den WIG-SchweiЯprozess. *DVS-Ber,* (135), p.149–152.

[17] Dilthey U., Wieschemann A. (1999) Prospects by combining and coupling laser beams and arc welding processes. *Rivista Italiana della Saldatura,* 52 (6), p.749-759.

[18] Petreski, M., Runchev, D., Vrtanoski, G. (2021) Hybrid laser arc welding – State of the art in technology. *Welding and welded structures*, 66(3), p.115-124.

[19] Petring D., Fuhrmann C. (2004) Recent progress and innovative solutions for laser-arc hybrid welding. *The 1st Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics*, p.7-10.

[20] Bunaziv I., Frostevarg J., Akselsen O.M., Kaplan AFH (2018a) Process stability during fiber laser-arc hybrid welding of thick steel plates. *Opt. Lasers Eng.* 102 (supplement C), p.34–44.

[21] Zhan X., Li Y., Ou W., Yu F., Chen J., Wei Y. (2016) Comparison between hybrid laser-MIG welding and MIG welding for the invar36 alloy. *Optics & Laser Technology,* (85), p.75–84.

[22] Kah P, Salminen A. and Martikainen J. (2011) The analysis of shielding gases in laser-arc hybrid welding processes. Proc IMechE, Part B: *J Engineering Manufacture, (*225), p.1073–1082.

[23] Runcev D. (2014) Tehniki na spojuvanje. Univerzitet „Sv. Kiril i Metodij“, Skopje.

[24] Zhen S., Duan Z., Sun D., et al. (2014) Study on microstructures and mechanical properties of laser-arc hybrid welded S355J2WþN steel. *Opt Laser Technol*, (59), p.11–18.

[25] www.fronius.com/en/welding-technology/products/robotic-welding/migmag-high-performance/laserhybrid/laserhybrid [Accessed on 30th March 2021].

[26] Kah P. (2012) Overview of the exploration status of laser-arc hybrid welding processes. *Rev. Adv. Mater. Sci.*, (30), p.112–132.

[27] Olsen F.O. (2009) Hybrid Laser-Arc Welding. Elsevier Science:Technology & Engineering.

[28] Petreski M., Runchev D., Vrtanoski G. (2022), Impact analysis of the hybrid laser arc welding parameters on structural steel – State of the art. *32nd Conference with International participationWelding* 2022, Vol.32, p.98-108

[29] Turichin G., Kuznetsov M., Pozdnyakov A., Gook S., Gumenyuk A., Rethmeier M., (2018) Influence of heat input and preheating on the cooling rate, microstructure and mechanical properties at the hybrid laser-arc welding of API 5L X80 steel. Procedia CIRP (74), p.748–751.

[30] European Standard: *EN 10027-1:2017 Designation systems for steels – Part 1: Steel names.* EN, (2017).

[31] European Standard: *EN 10027-2:2015 Designation systems for steels – Part 2: Numerical system.* EN, (2015).

[32] International Organization for Standardization: *ISO/TR 15608:2017 Welding — Guidelines for a metallic materials grouping system*. ISO, (2017).

[33] Wahba M., Mizutani M. and Katayama S. (2015) Hybrid welding with fiber laser and CO2 gas shielded arc. J. Mater. Process Technol., (221), p.146–153.

[34] Bagger, C. and Olsen, F.O. (2005). Review of laser hybrid welding, *J. Laser. Appl.* (17) p.2–14.

[35] Ma N., Li L., Huang H., Chang S., Murakawa H. (2015) Residual stresses in laser-arc hybrid welded butt-joint with different energy ratios. *Journal of Materials Processing Technology,* (220), p.36–45.

[36] Farhang F., Raino Mikael L., Morten K. (2017) Single-pass hybrid laser welding of 25 mm thick steel. *Physics Procedia,* 89, p.49-57

[37] Bunaziv I., Akselsen O.M., Salminen A., Unt A. (2016) The Fiber laser-MIG hybrid welding of 5 mm 5083 aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology, (233),* p.107–114.

[38] Kah P., Salminen A., Martikainen J. (2011) The influence of parameters on penetration, speed and bridging in laser hybrid welding. *J. Mechanika.,* 17(3), p.324–333.

[39] Papaefthymiou S.A. (2013) Root cause analysis of surface and internal defects of micro-alloyed S355 heavy plates. *Int. J. Struct. Integrity,* (4), p.91–107.

[40] Gao M., Zeng X., Yan J., et al. (2008) Microstructure characteristics of laser-MIG hybrid welded mild steel. *Appl. Surf. Sci.*, (254), p.5715–5721.

[41] Campana G., Fortunato A., Ascari A., et al. (2007) The influence of arc transfer mode in hybrid laser-mig welding. *J. Mater. Process Technol.*, (191), p.111–113.

[42] Katayama S., Uchiumi S., Mizutani M., et al. (2007) Penetration and porosity prevention mechanism in YAG laser-MIG hybrid welding. *Weld J.*, (21), p.25–31.

[43] Brian V. M. (2011) Hybrid Laser Arc Welding. *ASM Handbook Volume 6, Welding fundamentals and Processes*, ASM International.

[44] Ishida K., Tashiro S., Mizutani M., Tanaka M. (2020) Effect of focal position on laser – MAG arc hybrid weld bead of thick high – strength steel plate. 38(2), p.131-134

[45] Wei H.L., Blecher J.J., Palmer T.A., et al. (2015) Fusion zone microstructure and geometry in complete-joint – penetration laser-arc hybrid welding of low-alloy steel. *Weld J.*, (94), p.135–144.

[46] Liu T., Yan F., Liu S., Li R., Wang C., Hu X. (2016) Microstructure and mechanical properties of laser-arc hybrid welding joint of GH909 alloy. *Optics & Laser Technology,* (80), p.56–66.

[47] Ghazvinlool H.R., Honarbakhsh-Raoufl A., Shadfar N. (2010) Effect of the electrode to work angle, filler diameter and shielding gas type on weld geometry of HQ130 steel joints produced by robotic GMAW. *Indian Journal of Science and Technology.* 3(1).

[48] Jokar M., MalekGhaini F., Torkamany M.J, et al. (2014) Influence of shielding gas composition on weld profile in pulsed Nd:YAG laser welding of low carbon steel. *Iran J. Phys. Res.*, (14), p.41–46.

[49] Wahba M., Mizutani M. and Katayama S. (2016) Single pass hybrid laser-arc welding of 25 mm thick square groove butt joints. *Mater. Des.,* (97), p.1–6.

[50] Acherjee B. (2018) Hybrid laser welding: State-of-art Review. *Optics & Laser Technology*, 99 (1), p.60–71.

[51] Sathiya P., Mishra M.K., Soundararajan R., Shanmugarajan B. (2013) Shielding gas effect on weld characteristics in arc-augmented laser welding process of super austenitic stainless steel. *Optics & Laser Technology,* (45), p.46–55.

[52] Chung B., Rhee S. and Lee C. (1999) The effect of shielding gas types on CO2 laser tailored blank weldability of low carbon automotive galvanized steel. *Mater. Sci. Eng. A.*, (272), p.357–362.

[53] Rao Z.H, Liao S.M. and Tsai H.L. (2011) Modelling of hybrid laser–GMA welding: review and challenges. *Sci. Technol. Weld Join,* (16), p.300–305.

[54] [Bidi L., Mattei S., Cicala E., Andrzejewski H., Masson P.L., Schroeder J. (2011) The use of exploratory experimental designs combined with thermal numerical modeling to obtain a predictive tool for hybrid laser/MIG welding and coating processes. *Optics & Laser Technology,* (43), p.537–545.

[55] El Rayes M., Walz C. and Sepold G. (2004) The influence of various hybrid welding parameters on bead geometry. *Weld J*, p.147-153

[56] Kong F., Ma J., Kovacevic K. (2011) Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser–GMA welding process. *Journal of Materials Processing Technology,* (211), p.1102–1111.

[57] Nilsson K., Heimbs S., Engstrцm H., Kaplan A.F.K. (2003) Parameter Influence in CO2- laser/MIG Hybrid Welding. *Proc. of 56th Annual Assembly of the International Institute of Welding.* IIW Doc. IV-843-03, Bucharest, Romania.

[58] Salminen A., Unt A. (2015) Effect of welding parameters and the heat input on weld bead profile of laser welded T-joint in structural steel. *Journal of laser applications.* 27(1).

[59] Gebhardt MO., Gumenyuk A. and Rethmeier M. (2014) Solidification cracking in laser GMA hybrid welding of thick-walled parts. *Sci. Technol. Weld Join*, (19), p.209–213.

[60] Shi S. (2005) Laser and hybrid laser MAG welding of thick section C-MN steel. *International Forum on Welding Technologies in Energy Engineering*. Shanghai, China.

[61] Reutzel E.W., Kelly S.M., Sullivan M.J., Huang T.D., Kvidahl L., Martukanitz R.P. (2008) Hybrid laser-GMA welding for improved affordability. *J. Ship. Prod.*, 24(2), p.72–81.

[62] Chen Y, Feng J., Li L., et al. (2013) Microstructure and mechanical properties of a thick-section high-strength steel welded joint by novel double-sided hybrid fibre laser-arc welding. *Mater. Sci. Eng. A.*, (582), p.284–293.

[63] Bunaziv I., Akselsen O.M., Frostevarg J., Kaplan AFH (2018d) Deep penetration fiber laser-arc hybrid welding of thick HSLA steel. *J. Mater. Process Technol.* (256), p.216–228.

[64] Bunaziv I., Akselsen O.M., Frostevarg J., Kaplan AFH., (2019) Application of laser-arc hybrid welding of steel for low-temperature service. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 102(5), p.2601–2613.

[65] Mu Z., Chen X., Zheng Z., Huang A., Pang S. (2019) Laser cooling arc plasma effect in laser-arc hybrid welding of 316L stainless steel. *Int. J. Heat Mass. Transf.,* (132), p.861–870.

[66] Nielsen S.E, Andersen M.M, Kristensen J.K, Jensen T.A. (2002) Hybrid welding of thick section C/Mn steel and aluminium, *International Institute of Welding,* IIW doc. XII 1731-02.

[67] Nielsen S.E. (2015) High power laser hybrid welding – challenges and perspectives. *15th Nordic Laser Materials Processing Conference*, 15(1).

[68] Mazar Atabaki M., Ma J., Liu W., et al. (2015) Pore formation and its mitigation during hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel. *Mater. Des.,* (67), p.509–521.

[69] Thewlis G. (2004) Classification and quantification of microstructures in steels. Mater. Sci. Technol., (20), p.143–160.

[70] Unt A., Poutiainen I. and Salminen A. (2015) Influence of filler wire feed rate in laser-arc hybrid welding of T-butt joint in shipbuilding steel with different optical setups. Phys Proc, (78), p.45–52.

[71] Eriksson I., Powell J. and Kaplan A. (2013) Guidelines in the choice of parameters for hybrid laser arc welding with fiber lasers. *Phys Proc*, (41), p.119–127.

[72] Qi Y., Chen G. (2018) Root defects in full penetration laser welding of thick plates using steady electromagnetic force. *J. Mater. Process Technol.,* (260), p.97–103.

[73] Staufer H. (2007) Laser Hybrid Welding in the Automotive Industry. *Welding Journal,* (86), p.36–40.

[74] Kutsuna M., Chen L. (2002) Interaction of both plasma in CO2 laser—MAG hybrid welding of carbon steel. *International Institute of Welding,* IIW document, XII 1708-02.

[75] Frostevarg J. and Kaplan AFH. (2014) Undercuts in laser arc hybrid welding. *Phys. Proc.*, (56), p.663–672.

[76] Piekarska W., Kubiak M. (2013) Modeling of thermal phenomena in single laser beam and laser arc hybrid welding processes using projection method. *Applied Mathematical Modelling,* (37), p.2051–2062.

[77] Gao M., Zeng X., Hu Q., et al. (2008) Weld microstructure and shape of laser–arc hybrid welding. *Sci. Technol. Weld Join*, (13), p.106–113.

[78] Shanping L., Hidetoshi F. and Kiyoshi N. (2005) Effects of CO2 shielding gas additions and welding speed on GTA weld shape. *J. Mater. Sci.,* (40), p.2481–2485.

[79] Sokolov M., Salminen A., Kuznetsov M. et al. (2011) Laser welding and weld hardness analysis of thick section S355 structural steel. *Mater. Des.,* (32), p.5127–5131.

[80] Webster S., Kristensen J.K., Petring D. (2008) Joining of thick section steels using hybrid laser welding. Ironmak Steelmak, 35(7) p.496– 504.

[81] Üstündağ Ö., Gook S., Gumenyuk A., Rethmeier M (2020) Hybrid laser arc welding of thick high-strength pipeline steels of grade X120 with adapted heat input. *J. Mater. Process Technol.*, 275: 116358.

[82] Bunaziv I., Akselsen O.M, Ren X., Salminen A., (2015) Hybrid welding possibilities of thick sections for Arctic applications. *Phys. Procedia* 78 (supplement C), p.74–83.

[83] Petreski M., Runchev D., Vrtanoski G., (2022) Impact analysis of the hybrid laser arc welding parameters on structural steel – State of the art. *32nd Conference with International participationWelding 2022,* Vol.32, p.98-108

[84] Petreski M., Runchev D.,Vrtanoski G., Zdravevski F., Stankoski M. (2024) Effect of laser beam and arc power on weld bead geometry in hybrid laser arc welding of structural steel. *Welding and welded structures*, 4/2024, p.157-163.

[85] Liu W., Ma J., Yang G., et al. (2014) Hybrid laser-arc welding of advanced high-strength steel. *J. Mater. Process Technol.*, (214), p.2823–2833.

[86] Reutzel E.W., Sullivan M.J., Mikesic D.A. (2006) Joining pipe with the hybrid laser-GMAW process: Weld test results and cost analysis. *Welding Journal,* 85 (6), p.66-71.

[87] Staufer H. (2015) Laser hybrid welding and laser brazing: State of the art in technology and practice by the examples of the Audi A8 and VW-Phaeton. *The 3rd International WLT-Conference on Lasers in Manufacturing Conference*, p.203–208, Munich, Germany.

[88] Lee M., Chang W., Kweon Y., Lee D. (2005) Laser-MIG hybrid weldability of high strength steel for car industry. *The Laser Materials Processing Conference ICALEO*, p.134-142, Miami, USA.

[89] Roland F., Reinert T. and Pethan G. (2002) Laser welding in ship building—An overview of the activities at Meyer Werft. *The IIW International Conference in Connection withAnnual Assembly*, p.103–115, Copenhagen, Denmark.

[90] Gerritsen C.H.J, Weldingh J., Kristensen J.K. (2005) Development of Nd:Yag laser-MAG hybrid welding of T joints for shipbuilding, *The 10th Nordic Laser Materials Processing Conference,* p.395-406, Lulea, Sweden.

[91] Jasnau U. and Sumpf A. (2006) Laser hybrid welding with high power fiber laser—New chances for use of laser technology, *The Nordic Welding Conference,* Tampere, Finland.

[92] Orozco N.J. (2003) Fully integrated hybrid-laser welding control process, processes for laser hybrid welding. *The Laser Materials Processing Conference ICALEO*, p.31–40, Jacksonville, USA.

[93] Adamiec J., Wiecek M., Gawrysiuk W. (2010) Fibre laser usage in boiler elements' production for the power industry. *Welding International,* 24 (11), p.853-860.

[94] Davim J. P. (2021) Welding Technology, Springer Cham, Switzerland.

[95] Askeland, D. R., Wright, W. J., Bhattacharya, D. (2010) The science and engineering of materials. 6th ed. Cengage learning. Boston, USA

[96] European Standard: *EN 10025-2:2019 Hot rolled products of structural steels – Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels.* EN, (2019).

[97] Smiljanic M. (2004) Nelegirani konstrukcioni čelika – Materijali i njihovo ponašanje pri zavarivanju, Zavod za zavarivanje, Beograd.

[98] European Standard: *EN 1011-2:2001 Welding – Recommendations for welding of metallic materials – Part 2: Arc welding of ferritic steels.* EN, (2001).

[99] International Organization for Standardization (2017) ISO 15614-1:2017 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure test — Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys.

[100] International Organization for Standardization (2013) ISO 15614-14:2013 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure test — Part 14: Laser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys.

[101] International Organization for Standardization (2013) ISO 15609-6:2013 Specification and qualification of welding procedures for metallic materials — Welding procedure specification — Part 6: Laser-arc hybrid welding.

[102] International Organization for Standardization (2013) ISO 14732:2013 Welding personnel — Qualification testing of welding operators and weld setters for mechanized and automatic welding of metallic materials.

[103] Petreski M., Krstevska A.,Bogatinoski Z. (2023) Mechanical testing od HLAW welded joints in accordance with European standards – Theoretical approach. *Mechanical Engineering –Scientific Journal*, 40 (1), p.5-13

[104] International Organization for Standardization (2012) ISO 4136:2012 Destructive tests on welds in metallic materials — Transverse tensile test.

[105] International Organization for Standardization (2009) ISO 5173:2009 Destructive tests on welds in metallic materials — Bend tests.

[106] Barrt J. Goodno, James M. Gere. (2021) Mechanics of materials. 9th ed. Cengage learning. Boston, USA

[107] Germanischer Lloyd Aktiengesellschaft (2000) Rules for Classification and Construction - Materials and Welding. Hamburg, Germany.

[108] International Organization for Standardization (2012) ISO 9016:2002 Destructive tests on welds in metallic materials — Impact tests ─ Test specimen location, notch orientation and examination.

[109] International Organization for Standardization (2012) ISO 9015-1:2013 Destructive tests on welds in metallic materials — Hardness testing — Part 1: Hardness test on arc welded joints.

[110] International Organization for Standardization (2013) ISO 12932:2013 Welding — Laser-arc hybrid welding of steels, nickel and nickel alloys — Quality levels for imperfections.

[111] Frostevarg J., (2016) Comparison of three different arc modes for laser-arc hybrid welding steel. *Journal Laser Appl* 28:022407.

[112] Pantelic I. (1976) Uvod u teoriju inzenjeskog eksperimenta. Radnicki Univerzitet “Radivoj Cirpanov”, Novi Sad.

[113] Ranjit K. Roy (2010) A primer on the Taguchi Method, Second Edition, Society of Manufacturing Engineers, Michigan.

[114] Bajic D., Jozic S., Celent L. (2011) Cutting Force Analysis in Face Milling Using Rotatable Central Composite Design of Experiments and Taguchi Method. *Strojarstvo,* 53 (4), p. 243-248.

[115] International Organization for Standardization (2022) ISO 17636-1:2022 Non – Destructive testing of welds — X- and gamma – ray techniques with film.

[116] International Organization for Standardization (2021) ISO 10675-1:2021 Non – Destructive testing of welds — Acceptance levels for radiographic testing — Part 1: Steel, nickel, titanium and their alloys.

[117] International Organization for Standardization (2017) ISO 9017:2017 Destructive tests on welds in metallic materials — Fracture test.

[118] International Organization for Standardization (2019) ISO 6947:2019 Welding and allied processes — Welding positions.

[119] International Organization for Standardization (2016) ISO 17637:2016 Non-destructive testing of welds — Visual testing of fusion-welded joints.

[120] Shimon Y. Nof (2023) Springer Handbook of Automation, Springer Cham, Switzerland.

[121] American Welding Society. (2015) Welding Inspection Handbook. 4th ed., AWS B1C Standing task group on welding inspection book, Miami, USA.

[122] International Organization for Standardization (2013) ISO 22826-1:2013 Destructive tests on welds in metallic materials — Hardness testing of narrow joints welded by laser and electron beam (Vikers and Knoop tests)

[123] International Organization for Standardization (2007) ISO 6520-1:2017 Welding and allied processes — Classification of geometric imperfections in metallic materials – Part 1: Fusion welding.

[124] Babu S.S. and David S.A. (2002) Inclusion formation and microstructure evolution in low alloy steel welds. *ISIJ International,* 42, p. 1344-1353.

[125] Miller D.K. (2004) Determining the cost of welding - Part 2, *Welding Design,* The Lincoln Electric Company.

[126] Egerland S., Staufer H., Ruehrnoessl M. and Schorn M. (2017) Investigation of advanced laser-MAG tandem hybrid welding for joining gap-flawed thin sheet metal parts. *Journal Welding in the World,* 62, p.95-104.