УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКИ ФАКУЛТЕТ

Игор Радисављевић

УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА ЗАВАРИВАЊА НА СВОЈСТВА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА ДОБИЈЕНИХ ПОСТУПКОМ ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ АЛАТОМ

докторска дисертација

Београд, 2014

UNIVERSITY OF BELGRADE

FACULTY OF TECHNOLOGY AND METALLURGY

Igor Radisavljević

INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON JOINT PROPERTIES OF FRICTION STIR WELDED ALUMINUM ALLOYS

PhD Thesis

Belgrade, 2014

Ментор:

_____
др Ненад Радовић, ванредни професор
Технолошко-металуршки факултет, Универзитет у Београду

Чланови комисије за одбрану докторске дисертације:

_____
др Зорица Цвијовић, редовни професор
Технолошко-металуршки факултет, Универзитет у Београду

_____
др Ендре Ромхањи, редовни професор
Технолошко-металуршки факултет, Универзитет у Београду

_____
др Венцислав Грабулов, научни саветник
Институт ИМС, Београд

_____
др Александар Живковић, научни сарадник
ГОША ФОМ, Смедеревска Паланка

Кандидат:

_____
Игор Радисављевић

Датум одбране дисертације: _____

ЗАХВАЛНОСТ

Ова докторска дисертација је настала као део истраживања у оквиру пројекта Министарства просвете и науке Републике Србије: „Развој технологије производње и заваривања Al-Mg легура високе чврстоће за примену у конструкцијама друмских и железничких транспортних средстава“.

Израдом докторске дисертације руководио је др Ненад Радовић, ванредни професор, коме се захваљујем на изузетном ангажовању и свесрдној подршци у раду.

Велико хвала мом колеги и пријатељу, др Александру Живковићу, на свесрдној помоћи током извођења експерименталног дела, корисним предлозима и саветима.

Захваљујем се колегама из Одељења за металне материјале, Сектора за материјале и заштиту, Војнотехничког института, на пруженој помоћи и подршци у свим сегментима израде ове дисертације. Нарочиту захвалност изражавам Рајку Ђорићу на несебичној помоћи током извођења експерименталног програма ове дисертације.

Захваљујем се Министарству просвете и науке Републике Србије за подршку преко пројеката ТР 34018.

Финансирање израде ове докторске дисертације обезбедило је Министарство одбране Републике Србије, Уговор бр. 10656-2, на чему им се захваљујем.

УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА ЗАВАРИВАЊА НА СВОЈСТВА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА ДОБИЈЕНИХ ПОСТУПКОМ ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ АЛАТОМ

У раду је испитан УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА ЗАВАРИВАЊА НА СВОЈСТВА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА ДОБИЈЕНИХ ПОСТУПКОМ ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ АЛАТОМ. Коришћене су две комерцијалне алуминијумске легуре, 5052-H32 и 2024-T351, које су испоручене као плоче дебљљине 8mm. Како би се оценио утицај унете енергије на понашање материјала и квалитет завареног споја у раду су варирани параметри заваривања, при чему се однос брзине ротације и брзине заваривања (V_{rot}/V_{zav}) кретао од 3,16 до 51,30. Брзина ротације алата износила је 450, 600, 750, 950, 1180 и 1500 obr/min а брзина заваривања је варирана је од 23 до 380 mm/min. Угао нагиба алата износио је 1^0.

Сматра се да однос V_{rot}/V_{zav} указује да ли је за дате параметре заваривања могуће добити спој без присуства грешака, али не и какве ће он механичке карактеристике поседовати. Резултати ове дисертације указују да се на основу овог односа може само оријентационо претпоставити понашање споја. Иако се иста или приближно иста вредност односа V_{rot}/V_{zav} може остварити применом различитих параметара заваривања (нпр. 1180/116=10,17; 950/93=10,21; 750/73=10,27), добијени резултати дају основу да се претпостави да се услови одигравања процеса заваривања и формирања споја феноменолошки разликују. Поред односа V_{rot}/V_{zav}, велику улогу у добијању споја задовољавајућег квалитета има величина и константност притисне силе у вертикалном правцу.

Повећање брзине ротације алата (V_{rot}) има позитиван утицај на механичке карактеристике завареног споја. Смањење брзине заваривања проузрокује деградацију изгледа површине споја услед прегоревања материјала. Смањење брзине заваривања има позитивног ефекта на повећање величине угла савијања при коме долази до појаве прслине. Резултати одређивања енергије удара указују да смањење брзине заваривања позитивно утиче на повећње жилавост споја. Са друге стране при V_{rot}=1180 obr/min са смањењем брзине заваривања долази до

смањења вредности енергије удара. Овакво понашање може се објаснити улогом коју различита количина генерисане топлоте, при различитим параметрима заваривања, има на формирање споја. Остварене вредности у енергије удара заварених спојева у нивоу од 90% од енергије удара ОМ могу се сматрати изразито задовољавајућим. Енергије стварања прслине на нивоу од 34 до 43% укупне енергије удара су веће од енергије стварања прслине ОМ, која износи 30%. Са друге стране енергије ширења прслине на нивоу од 57 до 66% укупне енергије удара су мање од енергије ширења прслине ОМ која износи 70%.

Макро испитивањима попречног пресека заварених спојева уочено је постојање области грумена, ЗТМУ и ЗУТ-а, њихов положај и облик. Јасно изражене линије течења материјала указују на карактер и смер тока материјала при одвијању процеса заваривања и у сагласности су са литературним подацима. Положај, простирање и израженост линија течења зависи од количине унете енергије, односно параметара заваривања. Величина грумена се при истој брзини ротације алата повећава при смањењу брзине заваривања, услед веће количине унете енергије.

Микроструктурна испитивања су потврдила литературне наводе, да у области грумена и ЗТМУ, услед истовремене изложености и повишеној температури и механичком оптерећењу, долази до значајних промена у микроструктури и механичким особинама. Добијена рекристализована ситнозрна структура је нарочито изражена у области грумена и рукавца. Област ЗУТ-а је, због мале количине унете енергије, слабо изражена и не може се јасно одредити.

Добијене вредности затезне чврстоће завареног споја су на веома задовољавајућем нивоу јер је при различитим параметрима заваривања остварена висока ефикасност споја од преко 80%. Испитивања затезањем су показала да је најкритичније место завареног споја као целине, део који се налази у ЗТМУ непосредно уз област грумена.

Расподела тврдоће кроз пресек споја показује да је у целом завареном споју дошло до пада нивоа тврдоће у односу на основни материјал, што је последица процеса отпуштања до кога долази услед топлоте створене трењем током заваривања FSW поступком. Највећи пад тврдоће забележен је у ЗТМУ. Област

грумена је део завареног споја са највећом тврдоћом. До пораста тврдоће у грумену долази услед смањења величине зрна и/или издвајања секундарне фазе а последица су изражене рекристализације у овој области споја. Смањење V_{zav} повећава ниво тврдоће у грумену. У области ЗТМУ и грумена, ниво тврдоће у близини лица шава (зона испод алата) је изразито већи у односу на средину и корену страну споја. Ово се објашњава двоструким утицајем алата у овој зони. Наиме, са једне стране услед делимичне рекристализације која се одвија у тој зони долази до уситњавања зрна и/или издвајања секундарних фаза а са друге стране долази до израженог присуства термомеханичког напрезања, што за последицу има пораст тврдоће у овој зони. Резултати испитивања тврдоће су у сагласности са резултатима затезних карактеристика. Мапирањем области споја на основу расподеле тврдоће, одређени су положај и простирање најслабијих критичних области у којима долази до лома а у сагласности су са резултатима механичких и металографских испитивања.

Фрактографском анализом преломних површина уочено је постојање три типичне области прелома, које по локацији одговарају различитим условима који владају у овим зонама током формирања завареног споја. Ове области се формирају под утицајем алата током заваривања и зависе како од његове геометрије тако и од параметара заваривања. Карактеристично је присуство „тракавости“ у области грумена. Ове траке се на макроструктурном пресеку у грумену уочавају као „прстенови“.

Установљено је да је област ЗТМУ најподложнија корозији. Испитивањима није утврђено присуство питинг корозије, већ само ексфолиације (раслојавања).

Кључне речи: заваривање трењем алатом, параметри заваривања, геометрија алата, квалитет споја, легура 5052, легура 2024,

Научна област: Техничке науке

Ужа научна област: Металургија

УДК број: 621.791 : 691.771

INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON JOINT PROPERTIES OF FRICTION STIR WELDED ALUMINUM ALLOYS

INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON JOINT PROPERTIES OF FRICTION STIR WELDED ALUMINUM ALLOYS was studied in this work. Two commercial Al alloys 5052-H32 and 2024-T351 were received as 8 mm thick plates. In order to evaluate the influence of heat input during welding on alloys behavior and properties of weld joint, welding parameters were varied in broadly. Achieved ratio between rotation and welding speed was between 3,16 and 51,30, i.e. rotation rate was 450, 600, 750, 950, 1180 and 1500 rev/min, while welding speed was between 23 and 380 mm/min. The pin angle was 10. The welded joints were tested by means of both non-destructive (visual, penetrant and X-ray inspection) and destructive (metallographic, tension and hardness) testing. In all specimens typical zones are revealed, with corresponding differences in grain size.

The obtained results suggested that weld appearance was more affected by rotation rate than by welding speed, due to differences in generated heat level. Increasing R/v ratio leads to higher, both, heat input (expressed as pseudo-heat index R2/v) and stirring increment, implying that the behavior is not uniform.

Furthermore, it can be assumed that welding parameters and material flow have combined effect on weld appearance and they cannot be taken into consideration separately.

Increasing R/v ratio leads to greater size of weld nugget—width and depth. This is due to a higher heat input and stirring increment owing to increased R/v ratio. Note that higher heat input improves material flow around tool pin. In other words, ‘‘revolutions per one millimeter’’ of the weld metal is increased by increasing R/v ratio. Therefore, a large amount of frictional heat and plastic-work are produced, and thus material easily flows and bigger NZ is formed. Different spacing between rings is related to the pin forward movement per revolution, i.e., at a rotation rate of 750 and 1180 r/min and welding speed of 116 mm/min. The grain size revealed in the NZ and part of TMAZ is very fine. It is expected that, during very intensive deformation at high temperature, grain refinement is introduced by both deformation and recrystallization (static or even

dynamic). The fine and equiaxed grains in NZ arise from exposure to severe plastic deformation and the greatest heat input during welding process. The elongated grains in TMAZ undergo less plastic deformation and lower heat input than NZ. On the other hand, in the HAZ plastic deformation is absent and only heat input plays a role, so the microstructure seems to be nonhomogenous, leading to increase in grain size. In TMAZ and HAZ, recrystallized phenomenon doesn't occur, but smaller precipitates may coarsen during welding process and notably the coarsened grains may be observed. Also, grain size is not the same in all parts of NZ. Grains are smaller at the bottom of the weld than at the center or top. It is assumed to be due to the differences in heat generated level, governing by distance from tool shoulder and backing plate. Therefore, hardness distributions show very strong dependence of the microstructure, and it is a direct indicator of microstructural evolution during FSW

The welds exhibited a W-shaped hardness profiles, typical for FSW joints of precipitate hardening aluminum alloy. The hardness profiles in general show that the FSW joints hardness is lower than that of the base metal. Hardness decreases in the HAZ and TMAZ, which are the softest zone in FSW joints. The NZ, TMAZ and HAZ are softer due to dissolution and coarsening of the strengthening precipitates during thermal cycle. It is assumed to be because of the heat generated during welding and subsequent recrystallization. Therefore, this effect is the greatest in TMAZ, while in the NZ is sluggish. Also, the ratio between the lowest hardness value in TMAZ and hardness of the base metal is close to the value of joint efficiency obtained from tensile properties. Due to lack of symmetry, LHR hardness level and position (distance from weld center) depend on location across the weld as well as on welding parameters. In general, increasing the rotation rate at constant welding speed shows small to medium influence on LHR hardness and position, but increases the NZ hardness. On the other hand, as the welding speed increases, the hardness of softened zone also increases. The detailed hardness distribution maps are in very good agreement with the normal strain distribution and yield stress map, reported earlier. The tensile properties and fracture locations of the joints are in very good agreement and related to the hardness distributions. Fracture of Al_2Cu particles is most intensive in the NZ, because this is the region through which tool pin passes, and thus experiences the highest deformation during stirring. On the other hand, it can be assumed that the presence of coarse Al_2Cu

particles in TMAZ is the consequence of both stirring deformation and heat treatment. It isn't clear that the presence of coarse Al_2Cu particles in TMAZ is only the consequence of material flow or both material flow and heat treatment.

The obtained values for UTS are in very good agreement with the expectation that FSW joints should have greater joint efficiency in comparison with the joints welded using traditional techniques. The welding parameters significantly affect the tensile properties of the FSW joints, but also they can be varied over a relatively wide range. The tensile properties of the joints are lower than those of the base material and the average value varies between 252 to 398 MPa. The maximum average tensile properties of 395 and 398 MPa and also joint efficiency of 81.9% and 82.3% were observed for R/v ratio of 10.27 and 10.17, respectively. Elongations are far lower than those of the base materials. The maximum elongation of 8.0% was obtained for ratio R/v=10.27, while the elongations of the other joints vary between 1.5% to 7.9%. The tensile properties results for R/v ratio of 10.21 are inferior probably due to non-adequate material condition during process, i.e. insufficient ratio between heat input and material flow FSW joints mostly fractured along the LHR during tensile test. In most cases crack propagated along the contact line between NZ and TMAZ. It is assumed that this behavior can be related to the materials flow close to pin, i.e., probably the same feature that can introduce tunnel type defects. FSW 2024-T351 joints would fracture at the NZ/TMAZ interface or at the NZ, even at TMAZ/HAZ interface, depending on the applied parameters. These findings remark that the influence of FSW parameters on void defects formation, mechanical properties and fracture behavior is complicated and not jet systematically investigated.

Key words: friction stir welding, welding parameters, tool geometry, weld quality, alloy 5052, alloy 2024

Research field: Technical science

Specific field: Metallurgy

UDC number: 621.791 : 691.771

С А Д Р Ж А Ј

1. УВОД

2. ПРЕТХОДНА ИСТРАЖИВАЊА

2.1. АЛУМИНИЈУМ И ЛЕГУРЕ АЛУМИНИЈУМА

2.1.1. Системи легирања и означавање алуминијумских легура

2.1.2. Карактеристике алуминијумских легура

2.1.2.1. Термички необрадиве алуминијумске легуре серије 5xxx

2.1.2.2. Термички обрадиве алуминијумске легуре серије 2xxx

2.2. ЗАВАРИВАЊЕ АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА

2.2.1. Основни појмови и дефиниције

2.2.2. Конвенционални поступци заваривања

2.2.2.1. MIG поступак

2.2.2.2. TIG поступак

2.2.3. Специјални поступци заваривања

2.2.4. Заварљивост алуминијумских легура

2.2.4.1. Специфичност заваривања

2.2.4.2. Металуршки аспекти заваривања термички необрадивих легура

2.2.4.3. Металуршки аспекти заваривања термички обрадивих легура

2.2.5. Грешке при заваривању алуминијумских легура

2.3. ПОСТУПАК ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ АЛАТОМ – FSW

2.3.1. Основни принципи и карактеристике поступка

2.3.2. Структура споја завареног FSW поступком

2.3.3. Течење материјала и грешке при заваривању

2.3.3.1. Течење материјала

2.3.3.2. Грешке у завареном споју

2.3.4. Алат и уређаји за заваривање

2.3.5. Предности и недостаци поступка

2.3.6. Материјали заварљиви FSW поступком

2.3.6.1. Металуршке трансформације у споју алуминијумских легура

2.3.6.2. Расподела тврдоће

2.3.7. Механичке карактеристике FSW споја алуминијумских легура

2.3.7.1. Затезне карактеристике

2.3.7.2. Енергија удара
2.3.7.3. Замор
2.3.7.4. Заостали напони
2.3.8. Параметри заваривања
2.3.8.1. Брзина ротације алата
2.3.8.2. Брзина заваривања
2.3.8.3. Однос брзине ротације и заваривања
2.3.8.4. Притисна сила алата
2.3.8.5. Угао нагиба алата
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РАД
3.1. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ РАДА
3.2. МАТЕРИЈАЛ
3.2.1. Основни материјал
3.2.2. Материјал алата
3.3. ОПРЕМА ЗА ЗАВАРИВАЊЕ
3.3.1. Уређај за заваривање
3.3.2. Алат за заваривање
3.4. ЗАВАРИВАЊЕ
3.4.1. Заваривање легуре 5052-H32
3.4.2. Заваривање легуре 2024-T351
3.5. ИСПИТИВАЊА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА
3.5.1. Испитивања без разарања
3.5.1.1. Визуелни преглед
3.5.1.2. Испитивање пенетрантима
3.5.1.3. Радиографска контрола
3.5.1.4. Ултразвучна контрола
3.5.2. Испитивања механичких карактеристика
3.5.2.1. Одређивање затезних карактеристика једноосним затезањем
3.5.2.2. Одређивање савојних карактеристика савијањем у три тачке
3.5.2.3. Одређивање тврдоће
3.5.2.4. Одређивање енергије удара
3.5.3. Металографска испитивања

3.5.3.1. Макроструктурна испитивања

3.5.3.2. Микроструктурна испитивања

3.5.3.3. Електронска микроскопија – SEM

3.5.4. Корозионо понашање

4. РЕЗУЛТАТИ

4.1. ПРЕЛИМИНАРНИ РЕЗУЛТАТИ

4.1.1. Заваривање легуре 5052-H32

4.1.2. Заваривање легуре 2024-T351

4.2. ВИЗУЕЛНА, ПЕНЕТРАНТСКА, РАДИОГРАФСКА И УЛТРАЗВУЧНА КОНТРОЛА

4.3. ЗАТЕЗНА ИСПИТИВАЊА

4.3.1. Затезне карактеристике спојева легуре 5052-H32

4.3.2. Затезне карактеристике спојева легуре 2024-T351

4.4. ИСПИТИВАЊА САВИЈАЊЕМ

4.4.1. Савојне карактеристике спојева легуре 5052-H32

4.4.2. Савојне карактеристике спојева легуре 2024-T351

4.5. ТВРДОЋА

4.5.1. Расподела тврдоће кроз спој легуре 5052-H32

4.5.2. Расподела тврдоће кроз спој легуре 2024-T351

4.6. УДАРНА ЖИЛАВОСТ СПОЈЕВА ЛЕГУРЕ 2024-T351

4.7. КАРАКТЕРИЗАЦИЈА СТРУКТУРЕ

4.7.1. Макроструктурна анализа

4.7.1.1. Макроструктура спојева легуре 5052-H32

4.7.1.2. Макроструктура спојева легуре 2024-T351

4.7.2. Микроструктурна анализа

4.7.2.1. Микроструктура спојева легуре 5052-H32

4.7.2.2. Микроструктура спојева легуре 2024-T351

4.7.3. Фрактографија

4.7.3.1. Фрактографска анализа спојева легуре 5052-H32

4.7.3.2. Фрактографска анализа спојева легуре 2024-T351

4.8. КОРОЗИОНА ПОСТОЈАНОСТ СПОЈЕВА ЛЕГУРЕ 2024-T351

5. ДИСКУСИЈА

6. ЗАКЉУЧАК

ЛИТЕРАТУРА

ПРИЛОЗИ

Биографија аутора

1. УВОД

Поступак заваривања трењем алатом (FSW – Friction Stir Welding) је новијег датума и у својој суштини представља специфичан облик технологије заваривања трењем. Развијан је од стране британског Института за заваривање (TWI) а патентиран је 1991. године. Развој овог поступка заваривања мотивисан је потребом за превазилажењем проблема, првенствено код алуминијумских легура, који се јављају при класичним поступцима заваривања са топљењем материјала. Наиме, FSW поступак заваривања је процес спајања материјала у чврстом стању, без топљења и употребе додатног материјала а уз коришћење одговарајућег алата. Добијени спој је последица комбинације дејства механичког рада и при томе генерисане топлоте. Поступак заваривања трењем алатом отворио је простор за спајање метала заваривањем које је тешко или немогуће заварити конвенционалним поступцима заваривања. Узимајући у обзир растући ниво примене алуминијумских легура и легура лаких метала уопште, у грађевинарству и траснпортној индустрији, укључујући бродоградњу и авиоиндустрију, алуминијумске легуре и процеси њиховог спајања представљају све значајнији аспект.

Интензивна истраживања, која се и данас спроводе несмањеним обимом, допринела су освајању, развоју и сталном усавршавању како самог поступка тако и алата и пратеће опреме, а што је резултирало све масовнијом применом FSW поступка у индустријске сврхе. Показало се да је FSW поступак нарочито погодан за спајање свих врста алуминијумских легура, укључујући ту и легуре које су тешко заварљиве класичним поступцима заваривања са топљењем. Истраживањима спроведеним у области заваривања алуминијума и његових легура, обухваћен је велики број различитих типова легура из свих познатих серија легирања. Током година процес се константно усавршавао а спектар примене ширио тако да је данас, поред могућности заваривања свих типова алуминијумских легура, овим поступком могуће спојити и бакар и његове легуре, олово, титанијум и његове легуре, легуре магнезијума, цинк, легуре никла, конструкционе, нерђајуће и микролегиране челике. Данас је овим поступком

могуће заварити алуминијумске делове дебљине до 50mm у једном пролазу, односно до 75mm дебљине формирањем двостраног завара. FSW поступак се поред спајања истородних, може користити и за спајање разнородних материјала/легура ако је испуњен услов да су материјал и конструкција алата такви да могу радити на температурама топле пластичне прераде материјала који се заварују.

Заваривање FSW поступком не захтева употребу додатног материјала и/или заштитног гаса. За извођење заваривања није неопходна припрема делова који се спајају, што умањује трошкове и скраћује укупно време заваривања. Количина топлоте, генерисана трењем алата, која фигурира током процеса спајања је у поређењу са поступцима заваривања топљењем значајно мања. Услед мале количине унете топлоте, изостају фазе топљења и очвршћавања, те је избегнута могућност појаве топлих прслина и порозности а истовремено је обезбеђена геометријска стабилност, односно минимално кривљење и витоперење завареног комада. Такође, избегнуто је и присуство укључака и нечистоћа у завареном споју. Будући да се поступак заваривања трењем алатом одвија без топљења основног материјала, овим поступком је могуће заварити материјале који се иначе тешко заварују класичним поступцима са топљењем материјала, при чему се добија спој добрих механичких карактеристика који не захтева завршну обраду. Механичка испитивања спојева Al легура су показала да ефикасност споја (однос затезне чврстоће завареног споја и основног материјала) добијеног FSW поступком достиже вредност од 80% па чак и 100%, док класичан заварени спој добијен поступком са топљењем за исту легуру достиже ефикасност од свега 50 до 60%.

FSW поступак се веома лако потпуно аутоматизује и роботизује тако да га могу изводити и неквалификовани радници, односно лица која нису атестирани заваривачи. Радна средина у којој се поступак изводи је чистија, нема штетних испарења, дима, непријатних мириса, ултравиолетних и других зрачења.

Изузетно добре карактеристике споја, довеле су до динамичког продора примене FSW поступка у индустријске сврхе и у многим случајевима квалификовале га као незаменљив поступак при изради веома одговорних делова и конструкција. Као

веома савремен поступак заваривања, нашао је своје место у авио и аутомобилској индустрији, бродоградњи, производњи шинских возила, процесне опреме, свемирских летилица, војној индустрији, итд. Данас је FSW поступком могуће заварити делове различитих димензија, констукције и геометрије као што су плоче, лимови, цилиндри, склопни делови и то у свим међусобним 2D и 3D положајима при чему спојеви могу бити сучеони, преклопни, угаони, Т-спојеви, тачкасти, итд.

Кључни услов за формирање завареног споја код FSW поступка је генерисање адекватне количине топлоте на површини алат – заваривани материјал и способност транспорта (умешавања) овако загрејаног и омекшалог материјала око трна алата. Суштинска разлика између класичног заваривања трењем и FSW поступка је у начину генерисања топлоте. Код FSW поступка топлота се генерише на индиректан начин посредством алата за заваривање. Током транспорта загрејаног и омекшалог материјала око трна алата долази до његове значајне пластичне деформације, тако да су присутни и могу се идентификовати сви елементи на којима се заснива термомеханичка прерада на повишеним температурама. Наиме, при заваривању FSW поступком услед истовременог одвијања процеса деформације и рекристализације (статичке и/или динамичке) а у зависности од комбинације примењених параметара процеса заваривања, долази до интензивног уситњавања зрна у структури споја.

У нашој земљи FSW поступак још увек није у индустријској примени и до сада нису вршена нека опсежнија експериментална истраживања у овој области. Овај рад представља резултат првих експерименталних заваривања и карактеризације добијених заварених спојева.

У првом делу рада изложене су специфичности технологије заваривања трењем алатом. Објашњени су основни принципи, законитости и карактеристике поступка. Обрађена је конструкција алата за FSW поступак и његов утицај на добијање завареног споја задовољавајућих карактеристика. Разматрана је заварљивост алуминијумских легура и специфичност њиховог заваривања. Представљене су основе поступака заваривања са топљењем који се примењеују за спајање алуминијумских легура.

У другом делу рада приказано је сопствено експериментално истраживање на алуминијумским легурама из два система легирања – 2ххх и 5ххх. Истраживање је спроведено у две фазе: у првој фази за заваривање је одабрана добро заварљива легура серије 5ххх - AlMg2,5 (5052-H32). У другој фази заваривање је спроведено на тешко заварљивој легури високе чврстоће серије 2ххх - AlCu4,5Mg (2024-T351). Заваривање је спроведено са алатима сопственог дизајна и различитих геометријских карактеристика. Испитивања заварених спојева састојала су се од недеструктивних (испитивања без разарања) и деструктивних метода (испитивања са разарањем). Испитивања без разарања обухватала су визуелни преглед, ултразвучну и радиографску контролу као и испитивања пенетрантима а од испитивања са разарањем спроведена су механичка, структурна и корозиона испитивања.

Истраживања изложена у овој докторској дисертацији имала су за циљ испитивање утицаја промене геометријских карактеристика алата и параметара заваривања на механичке, структурне и корозионе карактеристике спојева алуминијумских легура 5052-H32 и 2024-T351 добијених применом FSW технологије заваривања.

2. ПРЕТХОДНА ИСТРАЖИВАЊА

2.1. АЛУМИНИЈУМ И ЛЕГУРЕ АЛУМИНИЈУМА

2.1.1. Системи легирања и означавање алуминијумских легура

Чист алуминијум има ниску чврстоћу, те се ограничено употребљава у оптерећеним конструкцијама. Механичке особине се најчешће повећавају легирањем, хладном деформацијом и термичком обрадом или комбинацијом неких од наведених поступака.

Легирањем је настао значајан број, већином двокомпонентних и трокомпонентних легура, које уз одговарајући процес прераде и додатне обраде постижу задовољавајућу чврстоћу у односу на масу, што омогућује њихову примену као конструкционих материјала. Најчешћи системи легирања дати су у Табели 2.1.

Табела 2.1. Системи легирања алуминијума [1,2].

ознака система	полупроизводи	примена
1xxx, чист Al	Фолије, лимови	Амбалажа, декорација
2xxx, Al-Cu	Лимови, траке, отпресци, отковци	Лимови за авио-индустрију
3xxx ,Al-Mn	Лимови, траке, отпресци, отковци	Општа намена
4xxx, Al-Si	одливци, жице	Додатни материјали, ауто индустрија
5xxx, Al-Mg	Лимови, цеви, отпресци, отковци	Бродоградња, резервоари, железница
6xxx, Al-Si-Mg	Лимови, цеви, отпресци, отковци	Аутомобилска индустрија
7xxx, Al-Zn-Mg	Лимови, траке, отпресци, отковци	Конструкције високе чврстоће

Легуре система 2xxx, 6xxx и 7xxx у највећој мери ојачавају термичком обрадом, док легуре система 1xxx, 3xxx, 4xxx и 5xxx ојачавају деформацијом. Због тога прву групу најчешће називамо ***"термички обрадиве легуре"***, а другу групу ***"термички необрадиве легуре"***.

Поред система легирања, у ознаци легуре наводи се и ознака стања легуре, која указује на који начин је добијена финална структура. У употреби су следеће ознаке: [2,3]

"F" - стање после топле пластичне прераде, без дефинисаних механичких особина;

"O" - жарено стање у коме материјал поседује најнижу чврстоћу;

"H" - стање добијено хладном деформацијом, иза које следе две цифре за ознаку начина прераде и степена хладне деформације. Најчешћа стања добијена хладном деформацијом су:

H1 - хладно деформисано (H12 - ¼ тврдо, H14 - ½ тврдо, H16 - ¾ тврдо, H18 – тврдо, H19 – екстра тврдо);

H2 - хладно деформисано, делимично жарено;

H3 - хладно деформисано, стабилизовано стање;

H4 - хладно деформисано, бојено и сушено.

"T" - стање добијено термичком обрадом, а цифра иза ове ознаке показује начин термичке обраде:

T1 - хлађено са температуре прераде и природно старено;

T2 - хлађено са температуре прераде, хладно деформисано и природно старено;

T3 - растварајуће жарено, хладно деформисано и природно старено;

T4 - растварајуће жарено, природно старено;

T5 - хлађено са температуре прераде и вештачки старено;

T6 - растварајуће жарено, вештачки старено;

T7 - растварајуће жарено, престарено и стабилисано;

T8 - растварајуће жарено, хладно деформисано и вештачки старено;

T9 - растварајуће жарено, вештачки старено и хладно деформисано.

2.1.2. Карактеристике алуминијумских легура

2.1.2.1. Термички необрадиве алуминијумске легуре серије 5ххх

У подручју освајања и развоја алуминијумских легура високе чврстоће, изражен је тренд примене легура високе деформабилности у конструкцијама транспортних средстава и побољшане корозионе отпорности у бродоградњи. Нарочита пажња посвећена је легурама на бази Al-Mg система легирања (легуре серије 5ххх) које спадају у групу термички необрадивих легура, односно не ојачавају након термичке обраде. Примена легура Al-Mg система легирања је веома перспективна и њихова заступљеност у актуелним конструкцијама транспортних средстава расте, јер поред погодних особина за ову намену, оне су најмање 10% јефтиније од легура серије 6ххх које се сада масовно уграђују. Легуре серије 5ххх поседују изванредне деформационе карактеристике, јако добру заварљивост и корозиону постојаност. Све ово их чини погодним за примену на местима где се траже алуминијумске легуре које поседују комбинацију ових особина. Како легуре ове серије постижу максималне механичке карактеристике деформационим ојачавањем, то њихова примена на местима где је завршна операција повезана са термичким третманом, услед присуства ефекта омекшавања, доводи до деградације постигнутих механичких особина (нпр. печење боје). Овај недостатак Al-Mg легура превазилази се додавањем малог садржаја Cu (до 0,5%), при чему однос Cu/Mg треба да буде у границама од 0,1 до 0,14. Додавањем бакра изазива се ефекат преципитационог таложења чиме се настоји да се сузбије ефекат омекшавања присутан при термичком третману. Низак однос Cu/Mg је кључан за висок степен очувања оригиналних механичких карактеристика легуре уз истовремено постизање довољеног ефекта таложног (преципитационог) ојачавања [4].

2.1.2.2. Термички обрадиве алуминијумске легуре серије 2ххх

Легура алуминијума 2024 серије 2ххх (AlCuMg) је једна од најпознатијих легура алуминијума високе чврстоће. Бакар је главни легирајући елемент. Механичке вредности достижу оне код меких челика. Иначе, фамилија 2ххх је позната по популарном и традиционалном називу - дурали. Захваљујући високој чврстоћи и

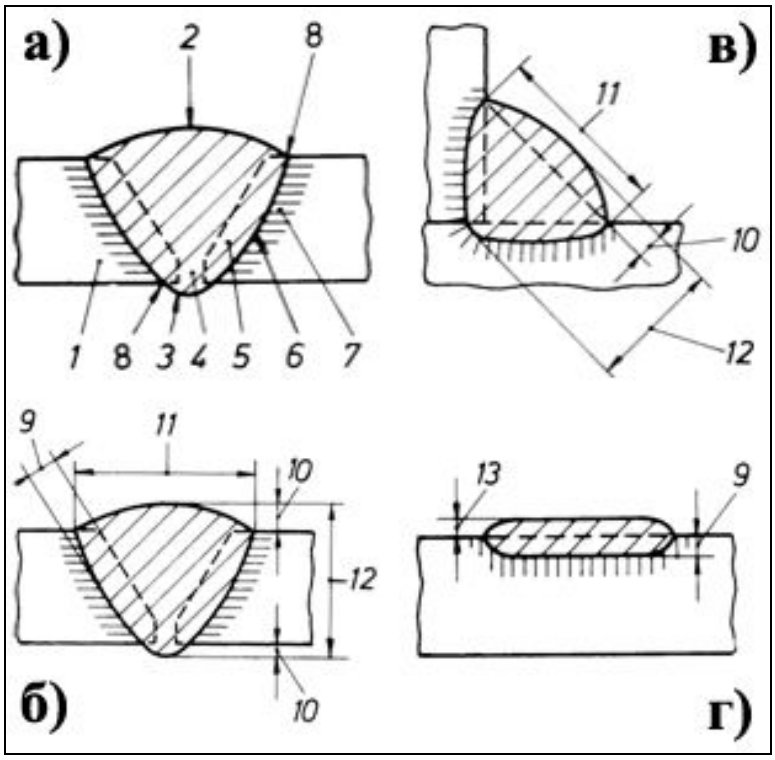
одличној отпорности на замор користи се за израду делова где се тражи добар однос чврстоће и масе. Лако се машински обрађује. Готово је немогуће спајање конвенционалним поступцима заваривања, који укључују топљење метала у зони заваривања. Нема добра антикорозивна својства. Ова легура се често облаже (платира) са чистим алуминијумом ради антикорозивне заштите. Масовно се употребљава у авиоиндустрији, наоружању и изради делова за транспортна средства.

Легура 2024 је легирана бакром и спада у групу термички обрадивих легура, које отврдњавају старењем. Након хомогенизационог (растворног) жарења, каљења и старења при собној температури (тзв. хладно отврдњавање), после неколико дана достиже највећу затезну чврстоћу (Rm). Поновним жарењем може да се преведе у меко стање [5].

2.2. ЗАВАРИВАЊЕ АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА

2.2.1. Основни појмови и дефиниције

Под завареним спојем се подразумева конструкциона целина (Слика 2-1) коју чине основни метал (1) и метал шава. На металу шава разликујемо лице шава (2), наличје шава (3), корен шава (4) и ивицу шава (8) (Слика 2-1а). Код поступака заваривања топљењем, шав настаје очвршћавањем истопљеног основног и додатног метала или само основног метала. Део основног метала који се топи у процесу заваривања и улази у састав метала шава зове се увар (5). Његова граница је на слици 2-1а обележена са (6) а дубина са (9) на слици 2-1б. Зона утицаја топлоте (ЗУТ), означена са (7) на слици 2-1а је део основног метала који је под утицајем загревања и хлађења током процеса заваривања претрпео структурне промене, али испод солидус линије. На слици 2-1б и 2-1в приказане су основне димензије шава, ширина (11), дебљина (12) и надвишење (10), за сучеони и угаони спој, респективно. Код навареног слој (Слика 2-1д) битна димензија је његова дебљина (13) [6].



Слика 2-1. Основни елементи завареног споја према JUS C.T3.001 [6].

Под технологијом заваривања подразумева се скуп операција (избор основног и додатног материјала, припрема основног материјала, избор поступка и параметара заваривања) које је потребно извести да би се добио заварени спој захтеваних особина.

Под техником заваривања подразумевају се начини извођења појединих операција.

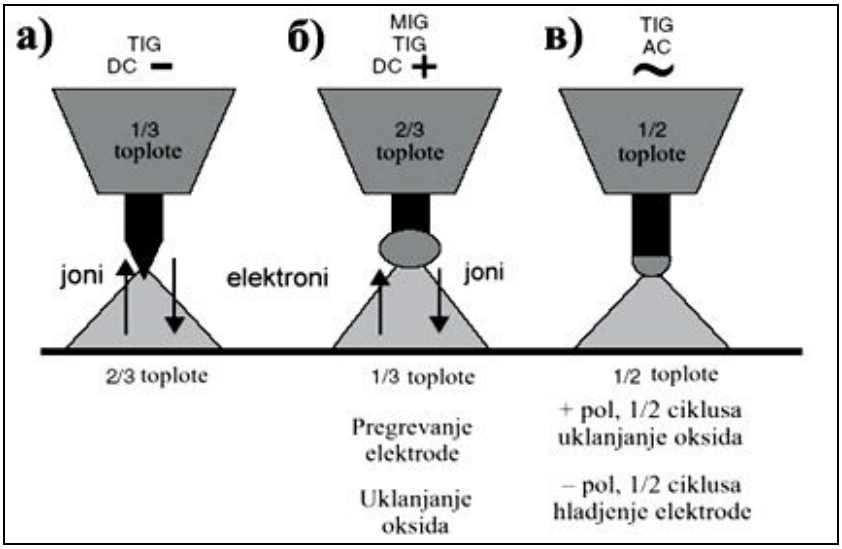
Поступци заваривања и спајања дефинисани су у стандарду JUS C.T3.001, а њихова подела на 6 група (електролучно, електроотпорно, гасно, заваривање у чврстом стању, други поступци заваривања, лемљење) и начин означавања су дефинисани у стандарду SRPS C.T3.012 [7,8].

За заваривање алуминијума и његових легура, најчешће се користе конвенционални поступци електролучног заваривања топљењем у атмосфери заштитног гаса и то нетопивом (TIG поступак) и топивом електродом (MIG поступак). Од специјалних поступака успешно се примењује заваривање плазмом, тачкасто електроотпорно заваривање, заваривање трењем, електронским снопом и ласером.

Као извори енергије користе се уређаји са једносмерном или наизменичном струјом. Код напајања једносмерном струјом разликујемо директни поларитет (електрода на негативном полу) и индиректни поларитет (електрода на позитивном полу).

Поларитет електроде у великој мери утиче на процес заваривања, а посебно на дубину провара, квалитет завареног споја и расподелу енергије. При директном поларитету 1/3 енергије се издваја на електроди а 2/3 на основном металу (Слика 2-2а). При индиректном поларитету (Слика 2-2б) расподела енергије је обрнута. Већи део енергије се издваја на електроди а квалитет завареног споја је одличан захваљујући феномену катодног чишћења. Наиме, када је електрода повезана на позитивни пол електрони са површине метала путују ка катоди, док позитивни јони са катоде бомбардују површину метала. Због своје велике масе позитивни јони ломе оксидни филм и врше његову дисперзију омогућујући на тај начин неометано течење растопљеног метала и његово спајање са основним металом [9].

При напајању наизменичном струјом, у 1/2 циклуса долази до уклањања оксидног филма, а у другој половини циклуса до хлађења електроде (Слика 2-2в).



Слика 2-2. Утицај поларитета електроде на расподелу топлоте и ефекат катодног чишћења [6].

Табела 2.2. Класификација поступака заваривања [6].

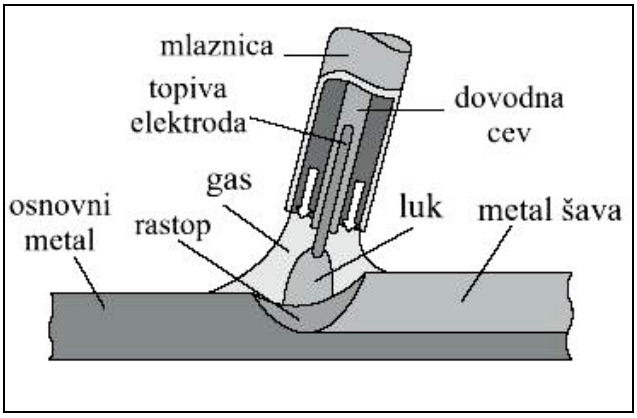
ознака	поступак
1	**Електролучно заваривање**
111	Обложеном електродом – Е
114	Пуњеном жицом
12	Под прашком – ЕПП
13	Топљивом електродном жицом у заштити гаса
131	Заштита у инертном гасу – MIG
135	Заштита у активном гасу – MAG
14	Нетопљивом електродом у заштити гаса
141	Инертни гас – TIG
15	Плазмом
185	Магнетно електролучно ротирајућим луком
2	**Електроотпорно заваривање**
21	Тачкасто
22	Шавно
23	Брадавичасто
24	Сучеоно варничењем
25	Сучеоно збијањем
3	**Гасно заваривање**
311	Окси-ацетиленским пламеном
4	**Заваривање у чврстом стању**
41	Ултразвуком
42	Трењем
43	Ковачко
44	Експлозијом
45	Дифузијом
48	На хладно
7	**Други поступци заваривања**
71	Алуминотермијско
72	Електрично под троском – ЕПТ
74	Индукционо
751	Ласером
76	Електронским снопом
91	**Тврдо лемљење**
913	У пећи
914	Урањањем у соли
916	Индукционо
94	**Меко лемљење**
97	**Заваривачко лемљење**

2.2.2. Конвенционални поступци заваривања

2.2.2.1. MIG поступак

Поступак електролучног заваривања у атмосфери заштитног гаса, при чему додатни материјал (жица) представља топиву електроду, назива се MIG поступак и шематски је приказан на слици 2-3. За заваривање алуминијума користе се

инертни гасови аргон, хелијим и њихове смеше, док се за заваривање челика користе и активне гасне смеше (угљен-диоксид, кисеоник) а такав поступак се назива MAG (Metal Active Gas).



Слика 2-3. Шематски приказ MIG поступка [6].

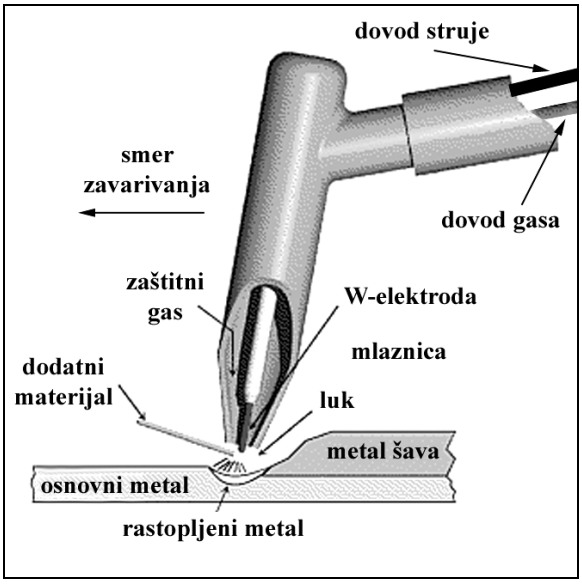
За електролучно заваривање топивом електродом у заштити гаса по правилу се користи једносмерна струја индиректне поларности (електрода на плус полу). При овом поларитету већи део енергије (2/3) издваја се на електроди, што омогућава повећање продуктивности уз добар квалитет споја услед ефекта катодног чишћења. Поступак даје стабилан лук, равномеран пренос додатног метала са малим губицима услед распрскавања и добре карактеристике споја у широком опсегу јачине струје. Директна поларност се користи уколико је неопходно добити што мање уваривање, нпр. код танких лимова, али се њена примена избегава због смањене стабилности лука. Наизменична струја се не користи због значајно смањене стабилности лука. Основни начини преноса додатног метала за MIG поступак су пренос у млазу, краткоспојени пренос и пренос у крупним капима а са новијим уређајима и импулсни пренос.

Највећи утицај на начин преноса додатног метала имају параметри струје (врста и јачина, карактеристика извора), заштитни гас, састав додатног материјала и слободна дужина електродне жице. Повећањем јачине струје пренос додатног метала се мења од краткоспојеног до преноса у млазу, али само са аргоном као заштитним гасом.

2.2.2.2. TIG поступак

Електролучно заваривање нетопивом волфрамовом електродом изводи се у атмосфери инертног гаса чија је улога да штити лук, електроду и растопљени метал. Шема процеса приказана је на слици 2-4. Додатни материјал се користи по потреби, док се танки лимови заварују без додатног материјала. У данашње време примена TIG поступка је знатно раширена, највише због одличног квалитета споја који се између осталог постиже бољом контролом унете топлоте а захваљујући раздвајању улога додатног материјала и електроде. Предности TIG поступка посебно долазе до изражаја код танких лимова од материјала као што су обојени метали и нерђајући челици, као и корених пролаза одговорних спојева. С друге стране, TIG поступак није конкуретан осталим електролучним поступцима када је у питању економичност заваривања дебелих и/или дугачких лимова од обичних конструкционих челика. Максималне дебљине које се комерцијално заварују овим поступком су од 4 до 6 mm.

За заваривање већине метала, користи се једносмерна струја директне поларности. За заваривање алуминијума овакав начин напајања се не користи због недовољног уклањања оксида. Ни индиректна поларност не даје задовољавајуће резултате због прегревања и топљења електроде. Стога се за заваривање алуминијума и његових легура по правилу користи наизменична [9].



Слика 2-4. Шематски приказ TIG поступка [6].

У току полуциклуса на позитивној електроди долази до уклањања оксида, а током полуциклуса на негативној електроди остварује се бољи провар уз истовремено хлађење електроде.

Материјал за израду нетопиве електроде мора поседовати:

- велику способност емисије електрона;
- високу температуру топљења;
- велику отпорност на хабање.

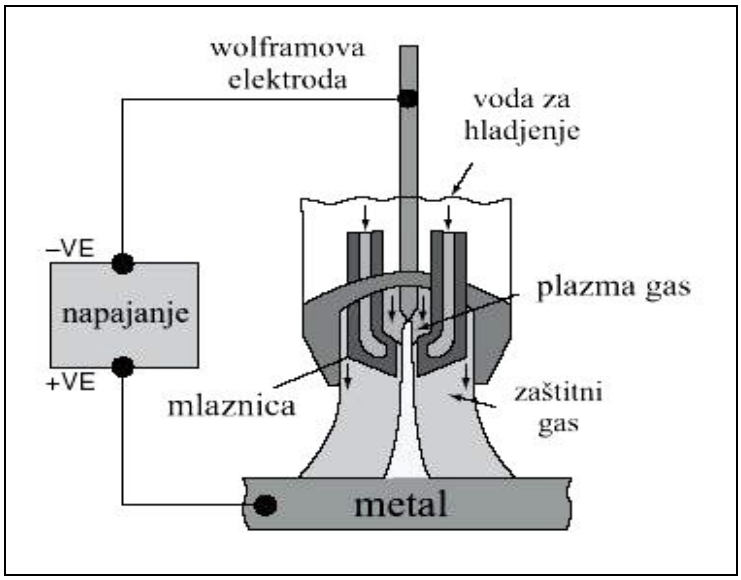
Додатак ThO_2 повећава способност емитовања електрона - поспешује успостављање лука, повећава радни век, повећава максималну јачину струје. Додатак церијум-оксида смањује брзину испаравања. Додатак цирконијум-оксида смањује присуство чврстих укључака у металу шава.

2.2.3. Специјални поступци заваривања

Од специјалних поступака заваравања у широкој примени је заваривање плазмом, заваривање електронским снопом и заваривање ласером. Ласерска техника се у великој мери користи у аутомобилској индустрији као високопродуктиван и аутоматизован поступак. У последње време у великој експанзији је поступак заваривања трењем са мешањем материјала *(friction stir welding)* [9].

Плазма поступак

Плазма је електрично проводљив, дисоцирани и високојонизовани гас тј. интензивиран електрични лук. Плазма лук настаје у специјалном плазма горионику - плазматрону (Слика 2-5) који се у основи састоји од електроде, млазнице и изолатора између њих. За напајање се користи једносмерна струја, при чему електрода има улогу катоде, а анода је млазница или радни предмет.



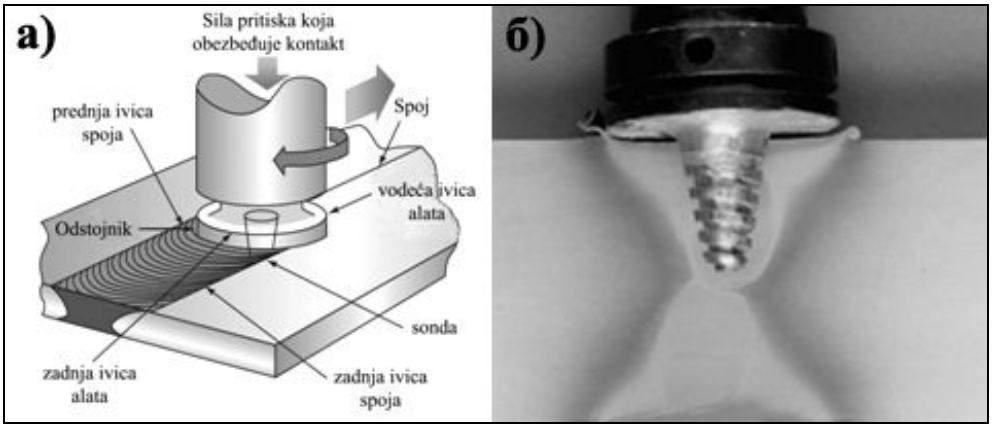
Слика 2-5. Шематски приказ плазма поступка [9].

Електрични лук се успоставља између волфрамове електроде хлађене водом и радног предмета а сужава се бакарном млазницом која се такође хлади водом. Сужавање лука је битна одлика плазма заваривања, јер се тиме постиже бољи распоред и виша температура у односу на сродни TIG поступак. Око електричног лука је омотач од заштитног гаса, који штити металну купку од оксидације и стабилизује електрични лук. У случају када је млазница анода електрично коло је затворено у плазматрону а лук плазме је индиректни. Ако се електрично коло затвара преко радног предмета лук се назива директни. Директним плазма луком преноси се већа количина топлотне енергије на радни предмет него индиректним, па је и дубина уваривања већа. Као плазма гас користе се Ar, H_2, N_2 и њихове мешавине или ваздух. Због лошег квалитета споја, раније је плазма поступак коришћен углавном за резање алуминијума. Развојем извора струје са квадратним таласом напајања овај проблем је превазиђен а плазма поступак је постао поуздан и конкурентан осталим сродним поступцима.

Заваривање трењем мешањем (Friction Stir Welding)

Ово је најзначајнији поступак завривања алуминијума развијен у последњих двадесет година. За заваривање се користи шипкасти алат од материјала отпорног на хабање (Слика 2-6а). Алат ротира великом брзином загревајући при томе околни материјал услед трења (Слика 2-6б). Материјал постаје пластичан и тече по линији споја. Одстојник не дозвољава неконтролисано истицање материјала,

при чему остварује знатну притисну силу која формира шав веома доброг квалитета. За овај поступак је, поред зоне утицаја топлоте, карактеристична и зона термомеханичког утицаја услед деловања алата. Поступак се углавном користи за праволинијско заваривање дугачких лимова и трака.



Слика 2-6. Шематски приказ заваривања трењем са мешањем [5,10].

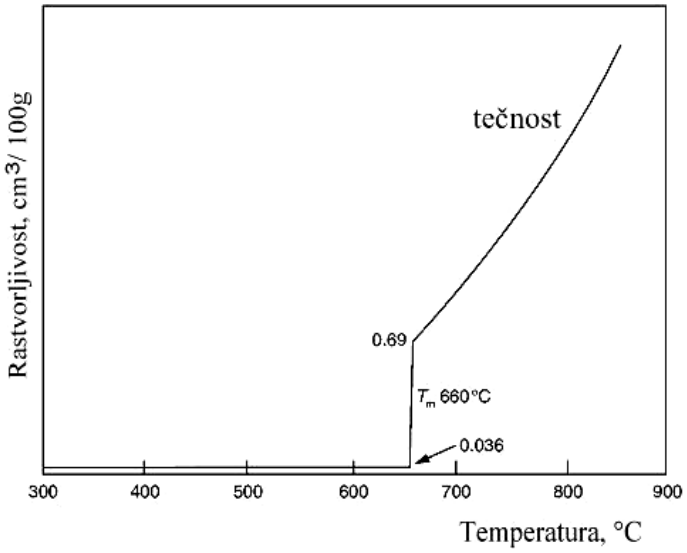
2.2.4. Заварљивост алуминијумских легура

2.2.4.1. Специфичност заваривања

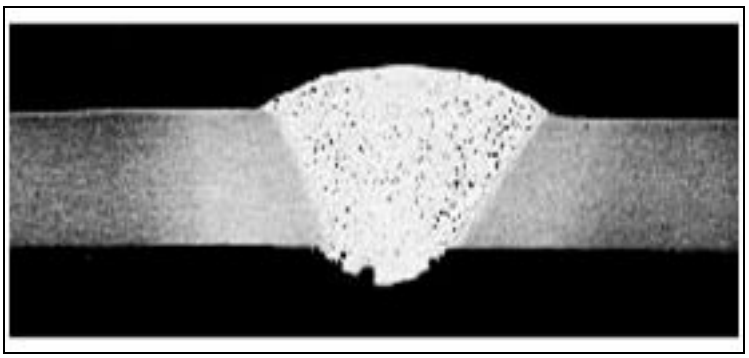
Заваривање Al-легура је праћено низом проблема од којих су најизразитији: присуство оксидног слоја, склоност ка топлим (кристализационим) и хладним (закаснелим) прслинама, присуство пора и укључака, омекшавање у зони утицаја топлоте и снижење корозионе постојаности. Велики афинитет алуминијума према кисеонику доводи до стварања стабилног, тешко топивог оксидног слоја Al_2O_3 на површини метала који има знатно вишу температуру топљења (око 2050°C) у односу на алуминијум (660°C). Оксидни слој мора бити уклоњен или поломљен пре почетка заваривања уз истовремено спречавање поновног формирања у току процеса заваривања. Најчешће се користи механичко уклањање оксидног слоја у зони жлеба и заваривање у атмосфери инертног гаса. Због веће специфичне тежине, комадићи оксида тону у растопљени метал стварајући грешке, за разлику од челика код кога оксиди испливавају на површину у виду шљаке [11].

Водоник се у растопљеном алуминијуму раствара веома брзо и лако (Слика 2-7). У процесу очвршћавања течног купатила његова растворљивост нагло опада тако да вишак водоника остаје заробљен при чему настаје гасна порозност (Слика 2-8).

Хемијски састав алуминијумских легура компклексно утиче на заварљивост, односно на скуп металуршко-технолошких појава у току топљења основног материјала, реакција у течном стању, кристализације и фазних преображаја од температуре очвршћавања до собне температуре.



Слика 2-7. Растворљивост водоника у алуминијуму [5].

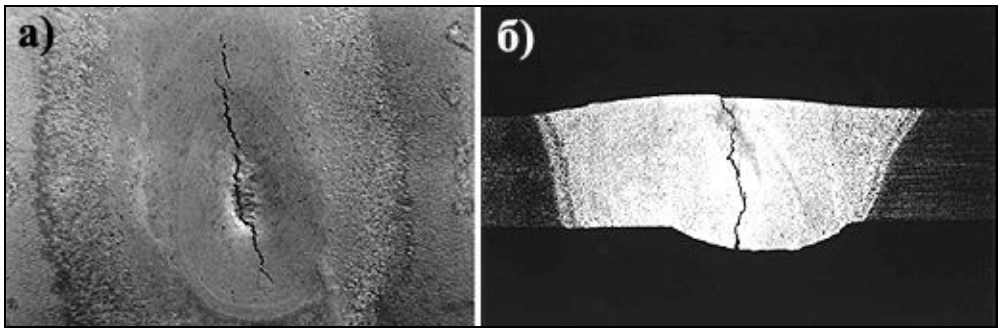


Слика 2-8. Гасна порозност у завареном споју [9].

Настанак топлих прслина је посебно изражен при заваривању термички обрадивих легура система Al-Zn-Mg са бакром, система Al-Cu са магнезијумом и система Al-Li са бакром и магнезијумом. Према механизму настанка, топле прслине се деле на солидификационе и ликвационе прслине.

Солидификационе прслине настају у току процеса очвршћавања течног купатила, када растопљени метал очвршћава у широком температурном интервалу, при чему еутектичка смеша последња очвршћава и издваја се по границама зрна.

Услед неравномерног уноса топлоте и великих скупљања у току очвршћавања јављају се затежући напони. Уколико ови напони достигну одређен ниво пре него што метал шава очврсне доћи ће до настанка солидификационих прслина, најчешће у централној зони споја, (Слике 2-9а и 2-9б). Примена основног и додатног материјала повишене чврстоће и поступака заваривања са што мањим уносом енергије и великом брзином заваривања снижава склоност ка настанку овог типа прслина [9].



Слика 2-9. Солидификационе прслине – TIG поступак: а) завршни кратер, легура 5083; б) легура 6082/4043 [9].

Ликвационе прслине настају у току процеса заваривања када у зони утицаја топлоте (ЗУТ), по границама зрна долази до делимичног омекшавања или растапања еутектикума и конституената са ниском тачком тољења. Уколико је присутан довољно висок ниво напрезања долази до стварања ликвационих прслина. У екстремним условима, ликвационе прслине се спајају и јављају се уздуж целог споја. Примена додатних материјала са температуром топљења нижом од основног материјала доприноси смањењу склоности ка настајању ликвационих прслина, тако што делимично омекшана зона очврсне пре настанка напона услед скупљања материјала.

Чврстоћа и дуктилност завареног споја зависе од врсте и стања основног материјала, додатног материјала, поступка и параметара заваривања, врсте споја, присуства грешака у споју и др. Најслабије место у завареном споју термички обрадивих легура је линија стапања у ЗУТ-у а код термички необрадивих легура је метал шава. У Табели 2.3 дат је преглед механичких особина спојева, одабраних термички обрадивих и необрадивих алуминијумских легура, добијених заваривањем електролучним поступком у заштити инертног гаса, TIG поступак.

Табела 2.3. Типичне механичке особине заварених спојева Al-легура [11,12].

Основни метал	Додатни материјал	После заваривања			Додатно термички обрађене		
		Затезна чврстоћа	Граница течења	Издужење	Затезна чврстоћа	Граница течења	Издужење
		MPa	MPa	%	MPa	MPa	%
Термички обрадиве легуре							
2014-T6	4043	234	193	4	345	-	2
2014-T6	2319	241	193	5	414	317	5
2219-T3	2319	241	179	3	276	228	2
6061-T6	4043	186	124	8	303	276	5
6061-T4	4043	186	124	8	241	165	3
7005-T5*	5356	317	207	10	*старено 30 дана на собној температури после заваривања		
7039-T6*	5556	324	221	10			
Термички необрадиве легуре							
3003	1100	110	48	24	Не ојачавају термичком обрадом		
5005	1100	110	48	15			
5050	5356	169	55	18			
5052	5356	193	90	19			
5083	5183	296	165	16			
5086	5356	262	117	17			
5154	5654	228	103	17			
5454	5554	234	110	17			
5456	5556	317	179	14			

Висока термичка проводљивост алуминијумских легура намеће потребу за уређајима велике снаге и променљиве брзине заваривања, како би се услед одвођења велике количине топлоте избегле варијације и дисконтинуитети у току протапања и спајања. Термичко ширење алуминијума је око два пута веће него код челика, при чему се заварени спој скупља за око 6% у току очвршћавања што отежава заваривање танких комада и сложених геометријских облика.

2.2.4.2. Металуршки аспекти заваривања термички необрадивих легура

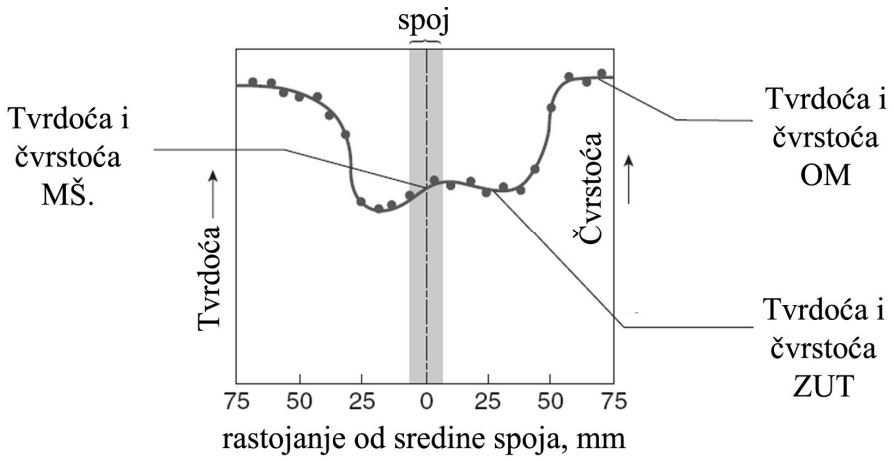
Поред чистог алуминијума који има одличну заварљивост из групе термички необрадивих легура добру заварљивост имају и легуре из система Al-Mn (3xxx) уз коришћење Al или Al-Si као додатних материјала. Због добре способности обликовања и одличне корозионе постојаности највећу примену имају у индустрији конзерви, за израду судова под притиском, грађевинских елемената и др. Легуре серије 4xxx (Al-Si) углавном се користе као додатни материјали при заваривању алуминијумских легура.

Највећу примену од термички необрадивих Al-легура, нарочито у транспортним средствима, имају легуре система Al-Mg и Al-Mg-Mn (серија 5xxx). Ове легуре имају склоност ка образовању топлих прслина али она опада ако се садржај Mg повећа изнад 2%. Применом додатних материјала са већим садржајем Mg у односу на основни материјал обезбеђује се добра заварљивост легура овог система. Практично, кристализационе прслине се ретко јављају при садржају Mg већем од 4%. Код легура овог система уобичајен је пад чврстоће у завареном споју на 80% од чврстоће основног метала [13]

Код стандардних легура AlMg5 и AlMg6, склоност према образовању топлих прслина не прелази 10-15%. Степен хладне деформације нема битног утицаја на појаву топлих прслина. Будући да су ово легуре високе чврстоће јавља се опасност од појаве хладних или закаснелих прслина. Ово је нарочито изражено код легуре AlMg6 која има највећу чврстоћу у групи термички необрадивих легура [13].

Заварени спојеви легура система AlMg са садржајем Mg од 4,5-5% имају високу општу отпорност према корозији и нису склони интеркристалној и напонској корозији у атмосферским условима. Међутим, легуре основног и додатног материјала система 5xxx са садржајем Mg изнад 3%, показују повећану склоност ка напонској корозији при температурама вишим од 66 °C. Стога се за заваривање ових легура, за рад на повишеним температурама, користи додатни материјал са садржајем Mg до 2,7%. Тренутно су у свету у почетној фази развоја легуре Al-Mg са додатаком Sc, које имају већу отпорност на корозију, мању густину и добру заварљивост [13].

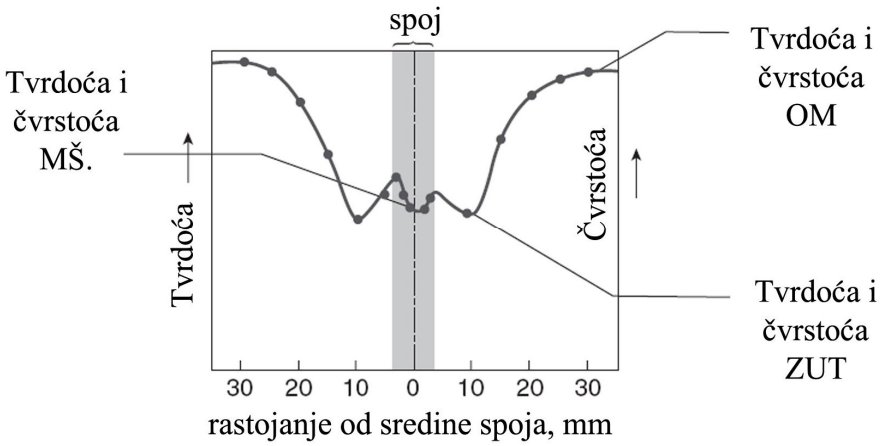
Код термички необрадивих легура, одсуство талога у структури представља позитивну особину у односу на процес заваривања. Многи од легирајућих елемената неопходних за таложно ојачавање могу довести до ликвације или појаве топлих прслина у току заваривања. У ЗУТ-у не долази до огрубљавања или растварања талога, а уклања се и потреба за накнадном термичком обрадом завареног споја. Деградација особина у ЗУТ-у термички необрадивих легура (Слика 2-10) дешава се као последица процеса опорављања, рекристализације и пораста зрна, а пад особина је далеко мањи него код термички обрадивих легура.



Слика 2-10. Шематски приказ промена особина **термички необрадиве** Al-легуре услед унете топлоте током заваривања.

2.2.4.3. Металуршки аспекти заваривања термички обрадивих легура

За термички обрадиве алуминијумске легуре је карактеристична деградација особина у ЗУТ-у (Слика 2-11). Деградација особина настаје услед микроструктурних промена, повезаних са термички зависним дифузионим процесима. Код легура из система 2ххх долази до растварања метастабилних честица талога, а код легура из система 6ххх и 7ххх до пораста и огрубљавања талога. Контролисаним уносом топлоте и заваривањем у више пролаза, уз елиминисање прегревања, смањује се деградација на најмању могућу меру.



Слика 2-11. Шематски приказ промена особина **термички обрадиве** Al-легуре услед унете топлоте током заваривања.

Додатна термичка обрада после заваривања донекле побољшава особине завареног споја, посебно код легура система 6ххх.

2.2.5. Грешке при заваривању алуминијумских легура

Могућност заваривања алуминијума и његових легура је повезана са тешкоћама које су условљене специфичним физичко-хемијским особинама алуминијума. На заварљивост Al и Al-легура највећи утицај имају следеће карактеристике:

- отпорност метала шава и основног материјала у ЗУТ-у према појави топлих (кристализационих) и хладних (закаснелих) прслина,
- отпорност метала шава према појави порозности и оксидних укључака,
- механичке особине метала шава и завареног споја као целине у односу на механичке особине основног материјала (пад особина у ЗУТ-у),
- отпорност заварених спојева према појави корозије у експлоатационим условима - радном медијуму.

Поред елемената заварљивости, појава грешака, односно дисконтинуитета у завареним спојевима, у знатној мери утиче на квалитет споја, његове механичке особине или корозиону постојаност. Грешке најчешће настају као последица лоше припреме споја, лоше одабраних параметара поступка заваривања, лоше технике заваривања као и недовољног познавања физичко-металуршких карактеристика алуминијума. Уобичајени типови грешака су: прслине (уздужне и попречне), прслине у кратеру, превелика порозност, укључци оксида алуминијума или волфрама (код TIG поступка), непотпуно стапање (налепљивање), грешке типа заједа и недовољна пенетрација. Неодговарајуће димензије и облик завареног споја такође спадају у стандардне грешке при заваривању [6,9].

Непотпуно стапање је вероватно најозбиљнија грешка обзиром да знатно слаби носивост споја а тешко се детектује. Манифестује се одсуством чврсте везе односно споја између метала шава и основног метала. Најчешћи узрок ове грешке је низак напон, слаба припрема ивица жлеба, предугачак лук и покушај заваривања оксидисаних површина.

Порозност настаје као последица заробљеног водоника у растопљеном металу. Извори порозности су најчешће влага и нечистоће (уље, масноће) који потичу из основног и додатног материјала као и из заштитног гаса. За елиминацију порозности неопходно је контролисати њене изворе, односно спроводити коректну припрему метала уз контролу процедуре заваривања. Што је метал шава

дуже у течном стању, заробљени гасови имају више времена да напусте растоп. Из тог разлога, спојеви заварени TIG поступком показују мању порозност од спојева заварених MIG поступком. Порозност се лако детектује стандардним радиографским методама и не исказује превелики утицај на особине споја.

Укључци у алуминијуму су обично металног порекла. Најчешће је то волфрам доспео кроз лук у току заваривања TIG поступком. Азот представља проблем јер са алуминијумом гради нитриде који снижавају механичке особине. Оксидни укључци представљају фино дисперговани Al_2O_3, који због веће специфичне тежине не испливава на површину растопљеног метала већ тоне и остаје заробљен у металу шава.

Прслине у току очвршћавања, настају услед великог термичког ширења комбинованог са ниском пластичношћу материјала на температурама блиским или изнад солидус температуре. Овој појави доприноси погрешан избор додатног материјала, мала брзина заваривања, мала количина додатног материјала, премали заварени спој у односу на дебљину материјала и др. Правилним избором додатног материјала повећава се пластичност у критичном температурном интервалу. Смањење попречних напрезања и коректна припрема жлеба повољно утичу на смањење настајања прслина. Легуре серије 6ххх су посебно склоне ка настајању солидификационих прслина.

За детекцију грешака насталих при заваривању алуминијума и његових легура користе се методе без разарања (NDT). Најчешће коришћене методе су радиографска контрола, контрола пенетрантима, Eddy current и ултразвучна контрола. У Табели 2.4 дат је преглед грешака које се могу дијагностиковати појединим методама. Без обзира на могућности наведених метода, најефикаснија и најјефтинија је визуелна контрола у току процеса заваривања. Честом визуелном контролом могу се уочити бројне грешке довољно рано, тако да се могу предузети корективне мере на време, пре наношења следећег слоја. Овим се на најмању меру снижава потреба за репаратурним заваривањем у каснијој фази процеса заваривања, а самим тим се снижавају трошкови заваривања.

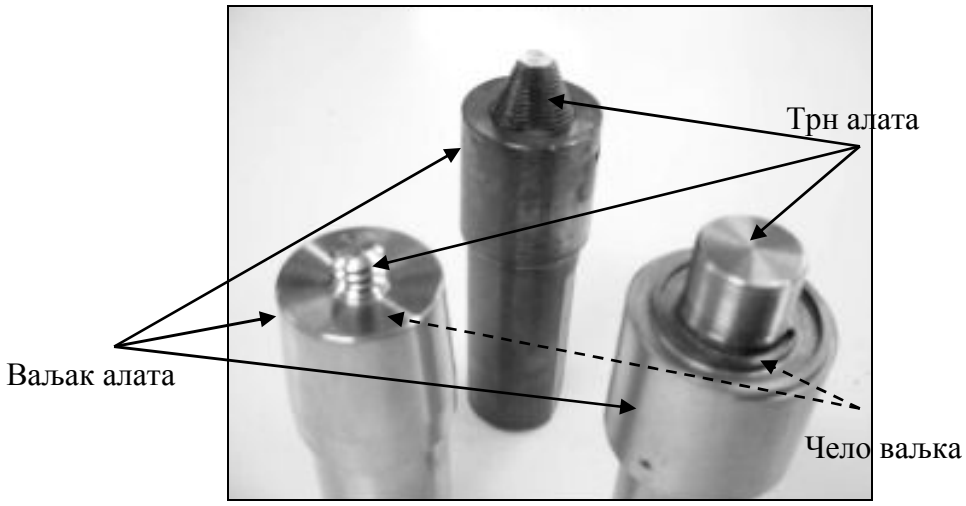
Табела 2.4. Могућности појединих NDT метода [11].

Метода	Непотпуно стапање	Поре	Прслине	Непотпуна пенетрација	Укључци
Радиографија	X	X		X	
Пенетранти			X		
Eddy currentt			X		
Ултразвук	X	X	X	X	X

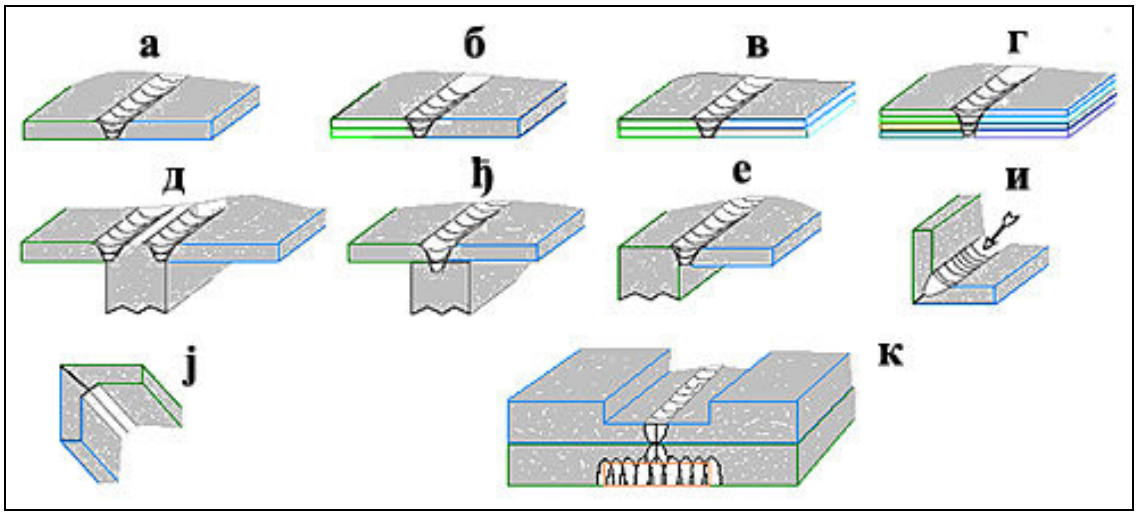
2.3. ПОСТУПАК ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ АЛАТОМ – FSW

2.3.1. Основни принципи и карактеристике поступка

Заваривање трењем алатом (FSW) је процес спајања материјала у чврстом стању, без топљења и без употребе додатног материјала, коришћењем одговарајућег алата (Слика 2-12). Спајање комада остварује се једновременом ротацијом алата и његовим транслаторним кретањем дуж споја. Поступак се може користити за образовање спојева различитих геометријских облика, као што су сучеони, преклопни, угаони, Т-спој итд (Слика 2-13). Спајање материјала је последица дејства механичког рада и при томе генерисане топлоте [14 - 20].

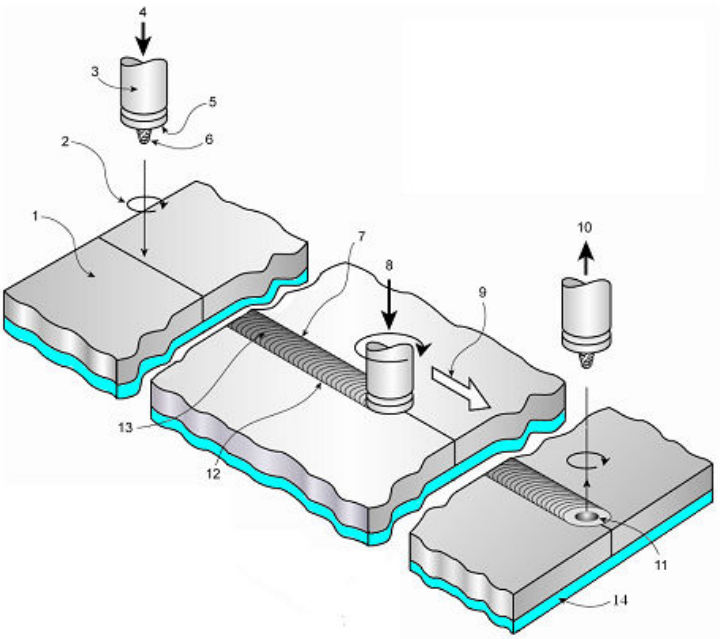


Слика 2-12. Изглед алата за FSW [20].



Слика 2-13. Облици спојева које је могуће добити FSW поступком: **а)** сучеони спој; **б)** комбиновани сучеони и преклопни спој; **в)** једноструки преклопни спој; **г)** вишеструки преклопни спој; **д)** „Т“ спој три елемента; **ђ)** „Т“ спој два елемента; **е)** угаони сучеони спој; **и)** угаони спој; **ј)** надглавни угаони положај; **к)** комбиновани спој велике дебљине [21].

Добијање завареног споја остварује се у неколико корака (Слика 2-14). Лимови (1) и (2), који се сучеоно спајају, притисну се један уз други и чврсто фиксирају за потпорну плочу (3), која поседује могућност хоризонталног транслаторног кретања. У зависности од конструкције уређаја на коме се врши заваривање, потпорна плоча може бити фиксна а да транслаторно кретање дуж споја врши алат. Алат (Слика 2-12) је цилиндричног облика и служи за генерисање топлоте и мешање материјала. Састоји се од ваљка и трна, при чему се пречници ова два дела разликују. Површина између ивице ваљка и ивице трна назива се чело ваљка и може бити равна или профилисана. Конфигурације трна такође могу бити различите. Алат се позиционира изнад постоља са радним комадима тако да је његова подужна оса нормална на линију споја два лима. У том положају алату се саопштава ротационо и транслаторно вертикално кретање на доле (Слика 2-15а) [22-27].



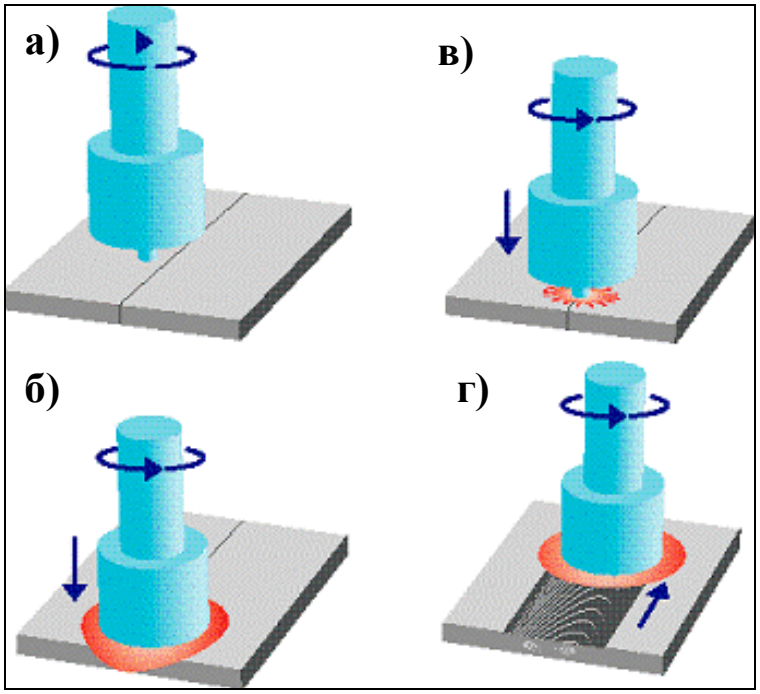
Слика 2-14. Принцип заваривања сучеоног споја FSW поступком: 1 и 2 – лимови који се спајају, 3 – потпорна плоча, 4 – ваљак алата, 5 – трн алата, 6 – чело ваљка, 7 – линија споја два лима [28].

Процес заваривања отпочиње тако што трн алата формира улазну рупу на линији споја два комада која се заварују (Слика 2-15б). Трн продире унутар радних комада све дотле док чело ваљка алата не оствари контакт са површином радних комада, односно не утисне се неколико десетих делова милиметра у њихову површину (Слика 2-15в). На тај начин чело ваљка алата, на комаде који се заварују, делује одређеном силом која мора бити таква да оствари потребан ниво притиска алата на комад. Овај притисак је неопходан да би се материјал задржао унутар појаса заваривања и да се услед трења, изазваног ротацијом алата, обезбеди довољна количина топлоте која омогућава правилно одвијање процеса заваривања. Топлота индукована ротацијом алата загрева материјал који се заварује на температуру топле пластичне прераде (око 0,8T топљења завариваног материјала). За већину алуминијумских легура, температура у зони заваривања се креће у интервалу од 430 до 500°C. Након остваривања потребног притиска алата на радни комад, почиње кретање алата дуж споја који се заварује (Слика 2-15г). Једновременом ротацијом алата и његовим кретањем дуж споја, омогућено је механичко умешавање омекшалог материјала радних комада под дејством трна алата. Овим механизмом се у зони алата повишава температура завариваних комада, што за последицу има омекшавање материјала у овој зони, чиме је

омогућено њихово механичко мешање. Услед дејства спољашњег оптерећења, у правцу нормалном на површину радног комада, долази и до пластичне деформације метала шава [29-35].

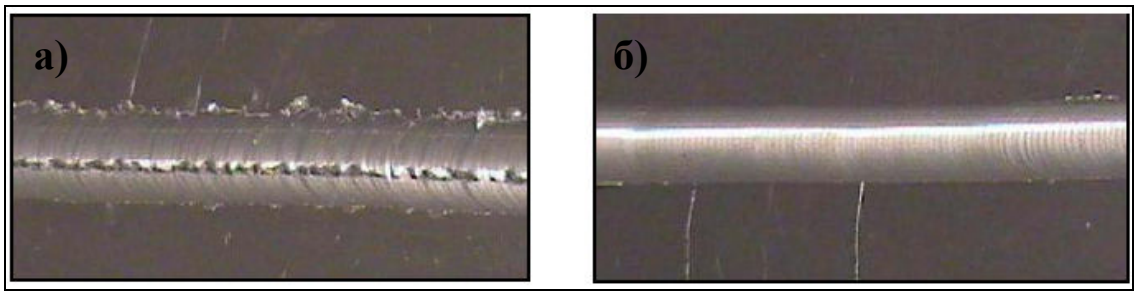
Корен шава се формира према облику подлоге док је лице шава, услед притиска чела ваљка алата на радни комад, равно и глатко. Услед механичког мешања материјала на повишеној температури, добија се ситнозрна структура чиме се поправљају механичке карактеристике шава, тако да се у неким случајевима добија спој чије механичке карактеристике превазилазе особине основног материјала. Величина зрна у шаву је мања од величине зрна у основном материјалу [36-40].

Обзиром на наведене карактеристике процеса, могуће је извођење линеарних, нелинеарних, обимних и тродимензионалних спојева при чему је, будући да се ради о спајању у чврстом стању, заваривање могуће извести у било ком положају (хоризонтални, вертикални, надглавни, орбитални).



Слика 2-15. Илустровани приказ заваривања сучеоног споја поступком FSW: **а)** ротација алата без контакта са радним комадом; **б)** формирање улазне рупе, стварање топлоте трењем услед контакта врха алата (трна) са радним комадом; **в)** довођење чела ваљка у контакт са радним комадом, проширење загрејане зоне услед трења чела ваљка и површине комада, **г)** једновремена ротација алата и његово трансверзално кретање дуж линије споја, формирање завареног споја [37,41].

За добијање квалитетног споја, без присуства грешака, неопходно је утврдити одговарајуће параметре заваривања, односно пројектовати добру технологију заваривања. Освајање технологије заваривања подразумева дефинисање геометрије и материјала алата, одређивање оптималних брзина ротације и транслације алата као и силу притиска алата на радни комад. Параметри заваривања зависе од физичких и механичких особина материјала који се заварује, дебљине завариваних комада као и од материјала и геометрије „трна“ и „ваљка“ алата. Познавањем параметара заваривања и њиховом променом, мења се количина унете енергије и ниво адијабатског загревања завариваних комада. На овај начин се применом правилно изабраних параметара заваривања постиже оптимално стање материјала комада који се заварују, неопходно за правилно одвијање процеса спајања и добијање споја потребног квалитета. На слици 2-16 приказан је изглед завареног споја оствареног заваривањем са различитим параметрима заваривања [42-46].

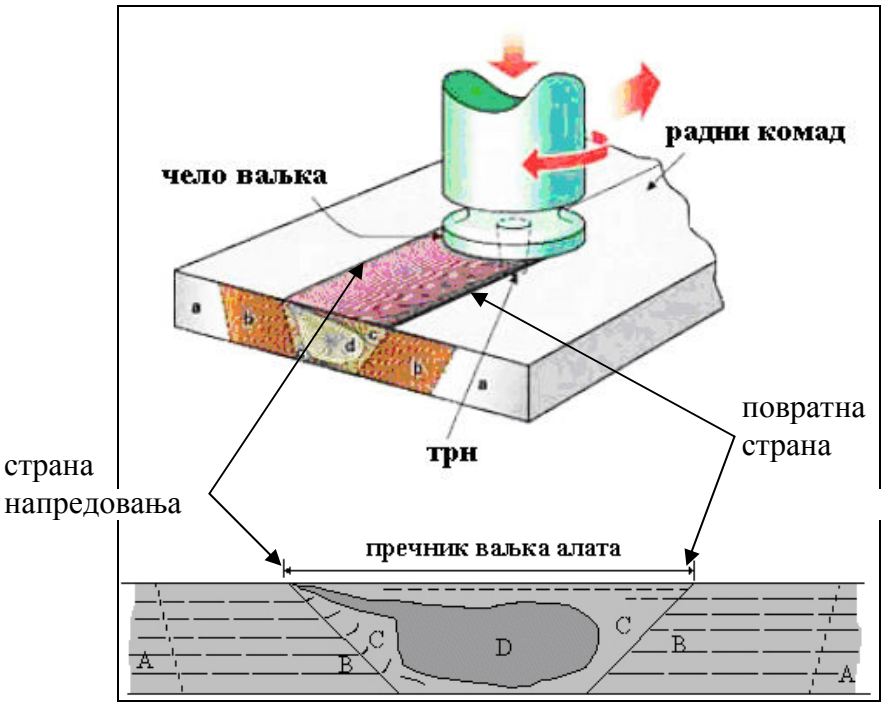


Слика 2-16. Изглед споја у зависности од параметара заваривања: **а)** неправилан избор параметара; **б)** правилан избор параметара [41].

На лицу метала шава се налазе карактеристични полукружни гребени (Слика 2-16б). Размак између два гребена одговара путу који алат пређе по радном комаду у смеру заваривања за време једне своје ротације. У зависности од врсте легуре и параметара заваривања ови гребени могу бити више или мање уочљиви. Горња површина споја која је у контакту са ваљком алата током заваривања представља лице шава док је доња површина споја која је у контакту са потпорном плочом корен шава [47-52].

2.3.2. Структура споја завареног FSW поступком

Важна особина FSW процеса, по чему се он битно разликује од класичних поступака заваривања, је да попречни пресек споја завареног FSW поступком није симетричан у односу на своју вертикалну осу (Слика 2-17).



Слика 2-17. Шематски приказ попречног пресека споја завареног FSW поступком: A) основни материјал; B) Зона утицаја топлоте – ЗУТ; C) Зона термо-механичког утицаја – ЗТМУ; D) грумен (део зоне термо-механичког утицаја) [53,54].

Као што је приказано на слици 2-17, јасно се уочава несиметричност између стране напредовања (лево) и повратне стране (десно) попречног пресека завареног споја. Страна напредовања завара се дефинише као страна на којој се поклапају смерови вектора брзине ротације и праволинијског кретања алата док се повратна страна дефинише као страна на којој су ова два вектора супротног смера. Ова јасно видљива несиметричност завара је последица различитог простирања топлоте и течења материјала на страни напредовања и повратној страни завареног споја. Услед ових разлика, јавља се и разлика у особинама ове две стране споја. Нпр. код алуминијумских легура које ојачавају старењем, тврдоћа у ЗУТ-у повратне стране је нижа, услед чега при затезном оптерећењу до лома долази баш у овој зони [46,55].

Топлота индукована трењем алата током заваривања, ствара у свакој тачки основног материјала стационарно топлотно стање које је одређено максимално достигнутом температуром и брзином хлађења, што за последицу има промену особина основног материјала. Додатну промену особина основног материјала изазивају дејство притисне силе и течење материјала услед механичког мешања. Разматрајући ове појаве и промену особина основног материјала, уочено је постојање неколико области завареног споја, различитих по својој структури и карактеристикама (Слика 2-17) [56,57]:

Основни материјал - ОМ (А), у свом полазном стању, је на довољно великој удаљености од завара тако да није изложен дејству механичког оптерећења и температуре. Због тога нема промена у микроструктури и механичким особинама.

Зона утицаја топлоте - ЗУТ (В) је део основног метала близу завара који је изложен дејству повишене температуре али није изложен механичком оптерећењу. Током заваривања овај део материјала пролази кроз одређени температурни циклус загревања и хлађења услед чега долази до промена у микроструктури и механичким особинама. Величина ЗУТ-а зависи од односа времена и температуре заваривања, односно представља функцију растојања од осе завара, топлотне проводљивости.

Зона термо-механичког утицаја – ЗТМУ (С) је део основног материјала који се налази непосредно испод ваљка алата услед чега је истовремено изложен и механичком оптерећењу и повишеној температури. Због тога у овом делу материјала долази до значајних промена у микроструктури и механичким карактеристикама материјала. Код алуминијумских легура, унутар ЗТМУ уочавају се три донекле јасно дефинисане области. Најизраженија је рекристализована област, тзв. ***грумен***, која је услед механичког оптерећења знатно деформисана. Још увек нема сагласности да ли је грумен саставни део ЗТМУ или посебна зона. Са леве и десне стране грумена (Слика 2-17) налази се област која је деформисана у мањој мери у односу на грумен а у којој, у зависности од врсте легуре, може али и не мора доћи до рекристализације зрна. Трећа област (тзв. рукавац) се налази изнад грумена и образује се током пролаза ивице ваљка преко претходно

формираног грумена. За разлику од алуминијумских легура, код других материјала не постоји јасно изражена, знатно рекристализована зона – грумен.

Грумен (D) завара је део основног материјала који се налази непосредно испод ваљка алата, директно под утицајем трна алата и који је због тога претрпео највећу пластичну деформацију. Ширина грумена је обично нешто већа од пречника трна алата. Као последица одигравања процеса рекристализације, микроструктура се састоји од хомогено распоређених ситних рекристалисаних зрна. Величина зрна, у зависности од врсте легуре и услова заваривања, се креће од 2 до 10 μm. Несиметричност шава је управо везана за постојање грумена (Слика 2-17). Прелаз од грумена ка ЗУТ-у је веома нагао на водећој страни завара док је прелаз на пратећој страни завара знатно постепенији [58-61].

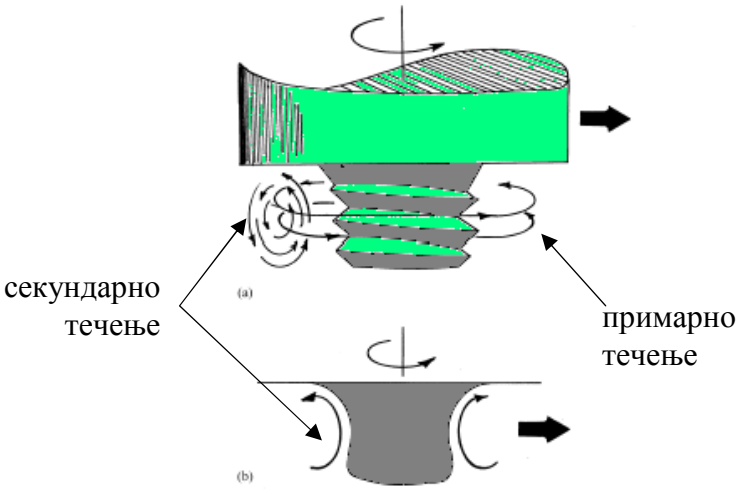
2.3.3. Течење материјала и грешке током заваривања

2.3.3.1. Течење материјала

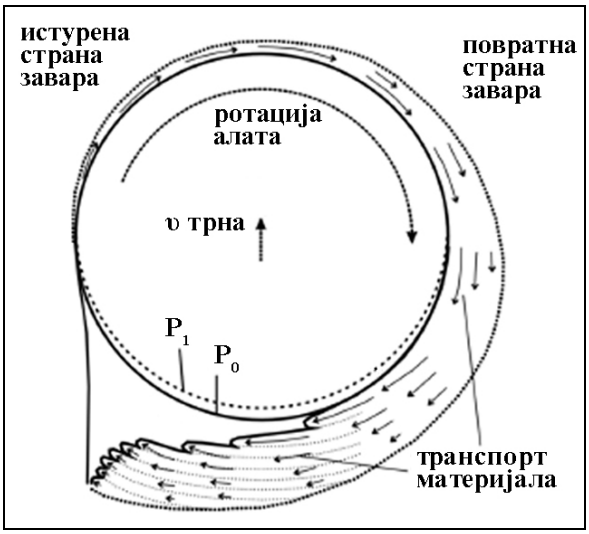
Познавање механизма и законитости течења материјала током FSW поступка је неопходно ради разумевања процеса формирања завареног споја и прорачуна расподеле топлоте током заваривања. Генерално постоје два приступа овом проблему: (1) омекшали материјал се третира као течност високог вискозитета а за прорачуне се користе принципи динамике флуида; (2) у другом приступу, пластично деформисање омекшалог материјала се моделује према принципима механике чврстог стања уз коришћење методе коначних елемената [46,62,63].

Течење материјала током извођења заваривања је веома сложено и може се представити помоћу две компоненте - примарног и секундарног течења материјала (Слика 2-18). Примарно течење се односи на течење материјала у хоризонталном правцу око трна алата и слично је ламинарном току течности око ротирајућег цилиндра (Слика 2-19). Да би се добио заварени спој без грешака, неопходно је да се примарним течењем око трна обезбеди пренос потребне количине материјала са повратне стране завара ка страни напредовања завара. Секундарно течење се односи на течење материјала у вертикалном правцу а последица је конфигурације трна и чела ваљка алата. Трн је обично дизајниран

тако да гура материјал према корену шава, проузрокујући на тај начин секундарну (вертикалну) компоненту протока материјала. Ваљак алата услед своје ротације и притиска који врши на површину радног комада повећава степен циркулације материјала дуж вертикалног правца. Наиме, материјал који се првобитно налазио близу лица завара на повратној страни, услед ротације бива повучен и пребачен на страну напредовања. Истовремено, материјал који се првобитно налазио близу лица завара на страни напредовања, помера се ка унутрашњости завара. Значај секундарног течења материјала се смањује са повећањем дебљине комада који се заварују. У случају веома дебелих комада секундарно течење се локализује на танку област уз лице завара а скоро целокупно течење материјала током заваривања се одвија под дејством трна [14,64-67].

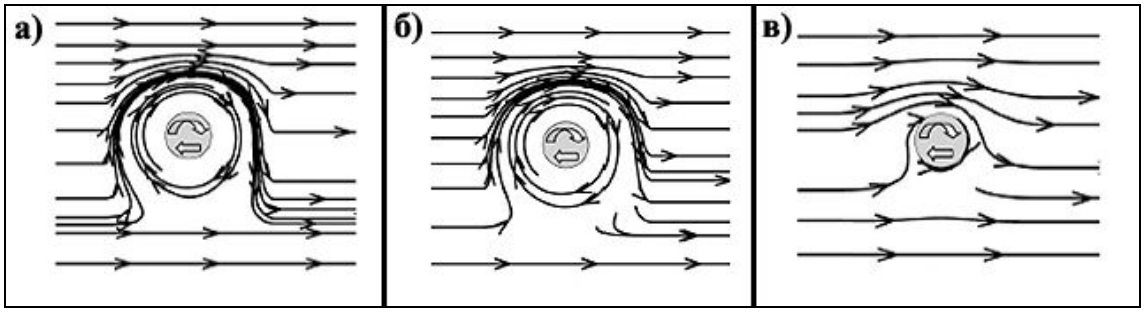


Слика 2-18. Примарно и секундарно течење материјала око трна алата [68].



Слика 2-19. Шематски приказ течења материјала око трна током заваривања; P0 – тренутна позиција трна, P1 – наредна позиција трна [69].

Примарно течење материјала у хоризонталном правцу одвија се у три карактеристичне области (Слика 2-20): (1) у области непосредно испод чела ваљка алата, течење омекшалог материјала одвија се под доминантним утицајем чела ваљка алата (Слика 2-20а); (2) друга карактеристична област се налази на половини висине трна алата а течење се одвија под доминантним утицајем трна алата. Течење у овој области веома зависи од геометријског профила трна (Слика 2-20б); (3) непосрдно испод врха трна алата одвија се релативно кретање између алата и омекшалог материјала. Услед изостајања контакта између трна и материјала, омекшали материјал се креће под дејством инерције већ покренутог материјала (Слика 2-20в). Укупни транспорт материјала и образовање завареног споја су резултат истовремене интеракције ова три ефекта [46,70-72].



Слика 2-20. Примарно течење материјала: **а)** област непосредно испод чела ваљка алата; **б)** област на половини висине трна алата; **в)** област испод врха трна алата [46].

2.3.3.2. Грешке у завареном споју

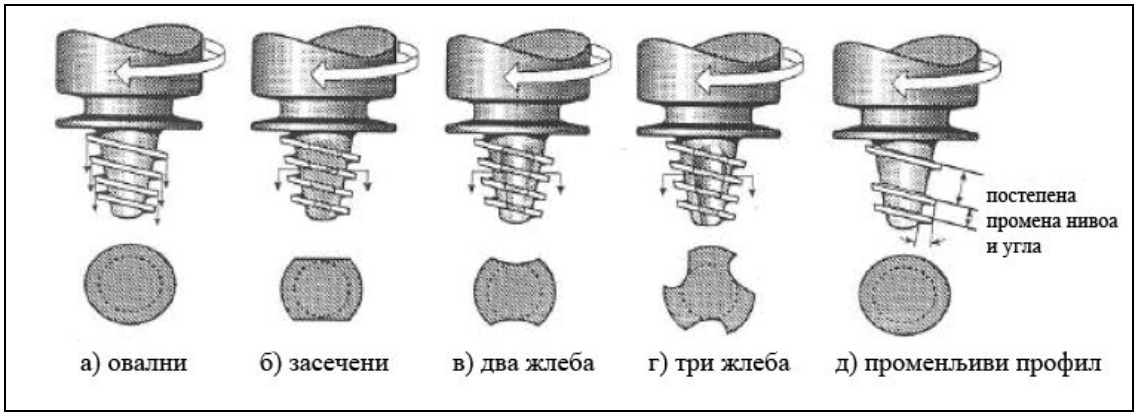
Код заваривања трењем алатом јављају се два типа карактеристичних грешака које су последица недовољног течења и степена деформације материјала:

1. недовољна пенетрација алата на кореној страни шава (непровар),
2. тунел на водећој страни.

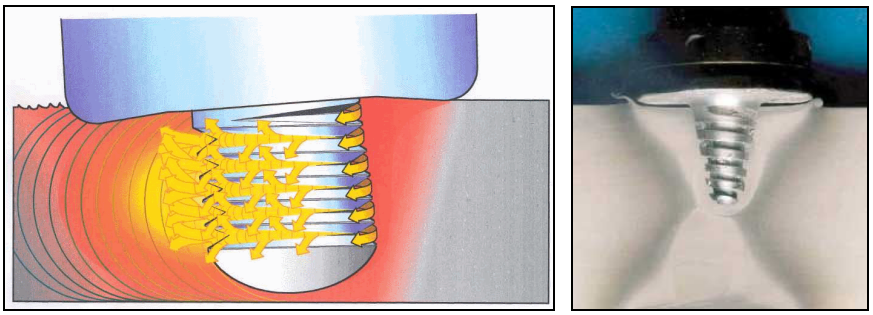
До недовољне пенетрације алата на кореној страни шава долази услед неодговарајућег тј. повећаног растојања између потпорне плоче, односно доње површине радног комада, и врха трна алата. У случају оваквог, превеликог, растојања материјал који се налази непосредно уз доњу површину радног комада није у довољној мери изложен термичком и механичком дејству алата, услед чега изостаје стварање металуршке везе у потребном степену. Односно, може се рећи да долази до образовања делимичних (непотпуних) металуршких веза. Међутим у овом делу материјала, чак и при оваквим неодговарајућим условима заваривања, остварује се слабо али довољно интимно дифузионо спајање материјала два радна комада тако да се ствара привид да недовољна пенетрација не представља запреминску грешку. Услед тога се овај тип грешке не може открити испитивањем пенетрантима и радиографским испитивањем. Појава грешке типа недовољне пенетрације има за последицу смањење затезне чврстоће метала шава и присуство прскотина у грумену. Одговарајућа раздаљина између врха трна и доње површине радног комада зависи од легуре, геометрије алата и параметара заваривања. Други тип грешке, тунел на страни напредовања, јавља се услед недовољног транспорта материјала са повратне стране ка страни напредовања завара око трна алата. До формирања тунела најчешће долази при великим брзинама заваривања, односно при великој транслаторној брзини кретања алата у хоризонталном правцу. При веома неповољним условима заваривања може доћи до „отварања“ тунела, односно пуцања лица шава, али најчешће присуство тунела није уочљиво осим у металографском пресеку завареног споја. Уколико је тунел присутан он је, због поновљиве природе FSW процеса, непрекидан и простире се целом дужином шава. Тунел представља запреминску грешку те се стога може открити радиографским испитивањима. Појава тунела се може избећи правилним избором параметара заваривања [73-78].

2.3.4. Алат и уређаји за заваривање

За заваривање материјала FSW поступком неопходан је специјалан алат, чије радне делове чине трн и ваљак. Функција алата је да генерише топлоту и изврши механичко мешање и пресовање материјала који се заварују. Трн алата има улогу да генерише топлоту и оствари механичко мешање материјала у омекшаном појасу и најчешће има цилиндрични облик, мада постоје и другачије профилисани трнови (Слика 2-21). Конфигурација трна одређује ток материјала при механичком мешању током процеса заваривања. Најбољи спојеви добијају се применом спирално профилисаних трнова, који својом конфигурацијом обезбеђују интензивније трење између алата и радног комада као и течење материјала дуж хоризонталне и вертикалне осе (Слика 2-22). Односно, трн спиралне геометрије поред простог умешавања материјала истовремено врши и потискивање омекшаног материјала, у зависности од конфигурације, или према лицу или према наличју шава [10,79-81].



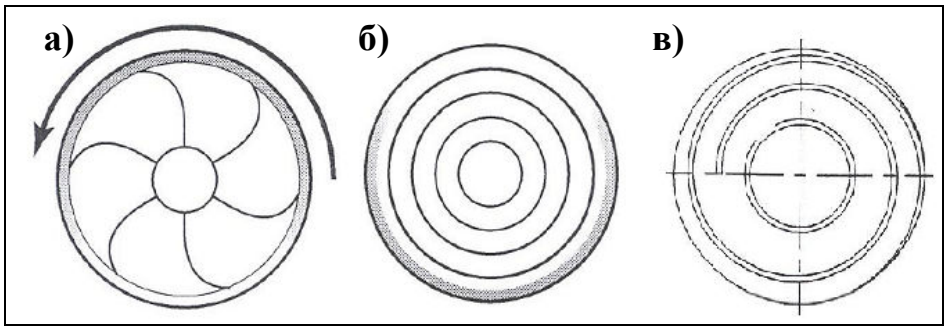
Слика 2-21. Различите конфигурације трна алата [10].



Слика 2-22. Шематски приказ тока материјала под дејством трна спиралне геометрије (лево), изглед пресека двострано завареног споја са спирално профиисаним трном (десно) [10]

Чело ваљка алата у највећем броју случајева има равну површину али може бити и са профилисаном површином (Слика 2-23). Алати са профилисаним челом ваљка, због своје конфигурације, остварују интензивније трење између алата и радног комада, што за последицу има већу количину створене топлоте и услед тога боље мешање материјала. С обзиром да је у овом случају трење интензивније, то се за исти радни комад може користити алат мањег пречника у односу на алат са равним челом ваљка. Профилисано чело ваљка има на себи удубљења која имају улогу да буду резервоар омекшаног материјала изнад оригиналне површине радног комада, олакшају пренос материјала око алата и смање стањење плоче у зони заваривања.

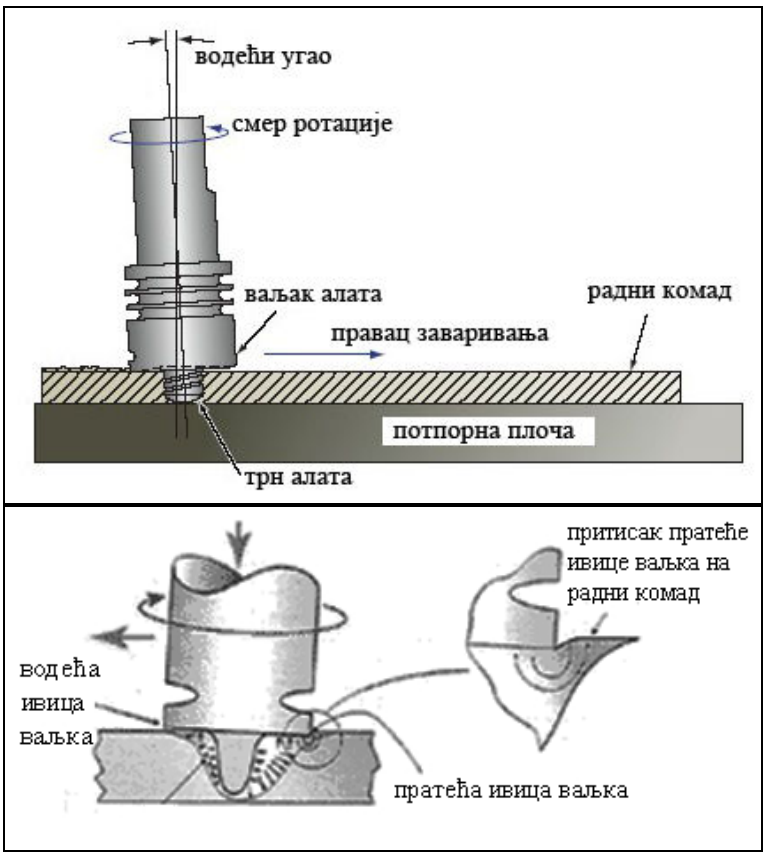
За заваривање материјала са високом температуром топљења (угљенички челик, нерђајући челик, легуре на бази никла, титанијум, итд.), због израженог хабања алата током заваривања, користе се алати израђени од легура на бази волфрама и поликристалног кубног бор-нитрида (Polycrystalline Cubic Boron Nittride – PCBN) или се у чело ваљка алата постављају улошци од PCBN. Оба алата дају заварени спој доброг квалитета, али алат израђен од волфрамове легуре је више осетљив на хабање због чега се у металу шава појављују укључци волфрама [82-84].



Слика 2-23. Шематски изглед профилисаних чела ваљака: **а)** лопатице; **б)** концентрични кругови; **в)** спирала [10].

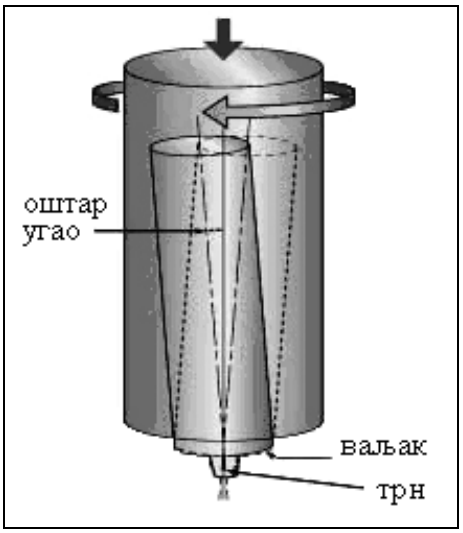
У односу на површину радног комада, оса алата може бити под углом од 90^0 или одступати од нормале. На основу досадашњих искуства установљено је да је повољније да се оса алата и вертикална оса радног комада не поклапају, односно да оса алата одступа од вертикалне осе радног комада за одређени угао φ (Слика 2-24), који се назива водећи угао. Величина водећег угла се креће у распону од 1^0 до 3^0. Постављањем алата у овакав радни положај, избегава се непожељна појава заривања водеће ивице чела ваљка у површину радног комада током

трансверзалног кретања алата а обезбеђује се боље пријањање и већа притисна сила пратеће ивице чела ваљка на површину комада [85]



Слика 2-24. Радни положај алата - оса алата нагнута за угао φ односу на вертикалну осу радног комада [37].

Поред ових конвенционалних алата, развијени су и асиметрични алати код којих је оса алата мало померена у односу на осу вретена машине а чело ваљка је управно на осу вретена машине (Слика 2-25). Код овакве конструкције, алат не ротира око сопствене осе а због асиметричног положаја трна у односу на нормалу радног комада обезбеђено је боље мешање материјала.



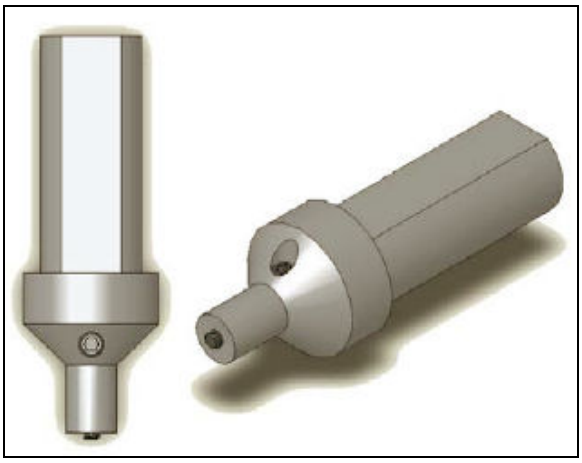
Слика 2-25. Шематски приказ конструкције асиметричног алата [80].

За добијање квалитетног споја веома је битно одредити и одржавати константним одговарајући положај чела ваљка алата у односу на површину радног комада. Наиме, потребно је спречити да ваљак током трансверзалног кретања алата превише продре у површину радног комада. Из тог разлога је неопходно остварити контролу дубине продирања алата у материјал а тиме и силу притиска која преко алата делује на радни комад. Подешавање и контрола положаја ваљка може се остварити механичким или хидрауличним системом управљања (Слика 2-26).

Слика 2-26. Механички (лево) и хидраулични (десно) систем подешавања и контроле положаја ваљка алата [53].

Потрошња алата зависи како од материјала од кога је алат израђен тако и од материјала који се заварује. Постојаност алата при заваривању материјала са ниском тачком топљења је већа у односу на постојаност алата при заваривању материјала са високом тачком топљења. Наиме, при заваривању материјала који

имају високу тачку топљења алат се троши брже као последица постојања великих сила трења и услед тога већег загревања и ерозије самог алата. Трн је највише оптерећени део алата и због тога се троши брже у односу на ваљак, односно тело алата. Ерозија димензија алата директно утиче на смањење прецизности дубине продирања трна у радни комад. Да би се продужио век трајања тела алата и задржао потребан степен прецизности, користи се тзв. алат са измењивим трном (Слика 2-27). Додатна предност овакве конструкције алата је што се може подешавати радна дужина трна те се један алат може користити за заваривање комада различитих дебљина. Алати који се користе за заваривање материјала са ниском тачком топљења обично се израђују од алатних челика док се за заваривање материјала са високом тачком топљења користе алати израђени од легура на бази волфрама или од поликристалног кубног бор-нитрида (PCBN).



Слика 2-27. Изглед алата са измењивим трном [41].

При избору материјала за израду алата за заваривање FSW поступком, мора се водити рачуна да материјал алата треба да има знатно већу чврстоћу од материјала који се заварује. Такође, материјал алата мора да поседује добру отпорност на замор и хабање, добру топлотну проводљивост, жилавост и да буде хемијски стабилан у радним условима.

Заваривање FSW поступком могуће је извести на класичним глодалицама уз њихово одређено прилагођавање. Битан услов је да је машина у стању да обезбеди потребну брзину ротације алата, кретање или алата или радног комада у простору, довољан притисак на радни комад, геометријску стабилност и да је могуће фиксирати радни комад за сто машине. Поред ових прилагођених машина постоје

и наменски уређаји, предвиђени искључиво за заваривање поступком трења алатом који омогућавају већу флексибилност у раду и генерално дају спојеве бољег квалитета.

За добијање завареног споја задовољавајућег квалитета FSW поступком, неопходно је да уређај на коме се ради омогућава контролу брзина ротације и трансверзалног кретања алата као и силе у вертикалном правцу (дуж z-осе). Брзина трансверзалног кретања алата у својој суштини представља брзину заваривања. Велики утицај на квалитет добијеног споја има вертикална позиција алата, односно сила која преко алата делује на радни комад те и она мора бити контролисана. Однсно, за израду спојева задовољавајућег квалитета потребно је правилно изабрати (контролисати) следеће параметре заваривања:

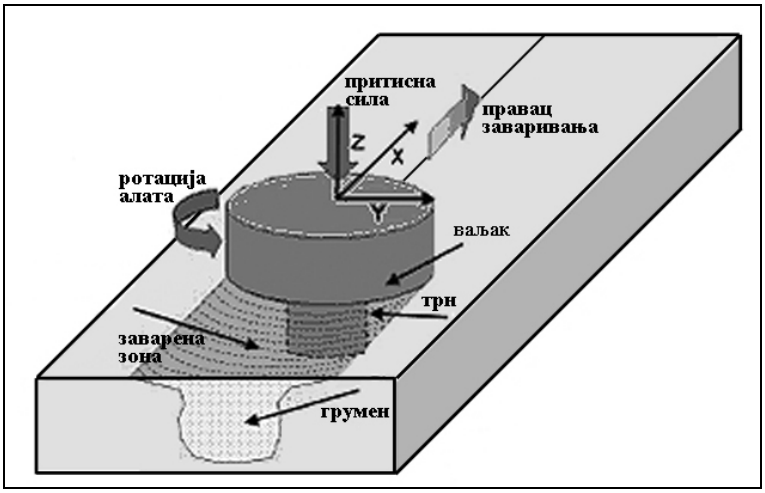
- брзину ротације алата (број обртаја у у јединици времена),
- брзину заваривања (пређени пут у јединици времена),
- величину силе која делује у правцу z – осе.

Правилан избор ових параметара зависи од легуре која се заварује, дебљине радног комада и нарочито од геометрије алата који се користи. Наравно, подразумева се да се ни један од наведених параметара не може бирати независно од преостала два. При избору параметара заваривања у обзир се морају узети и фактори који немају директног утицаја на могућност добијања задовољавајућег шава, као што су нпр. капацитет машине и издржљивост алата, али ипак утичу на процес заваривања у целини. То у суштини значи да је неки задовољавајући завар могуће извести нпр. применом веома велике силе у правцу z – осе и малом брзином ротације алата. Међутим ако ова комбинација параметара превазилази могућности машине (превелика сила или немогућности добијања захтеваног обртног момента) онда се параметри морају кориговати и прилагодити могућностима машине.

Током процеса заваривања, машина преко алата преноси у z – правцу (правац нормалан на површину радног комада) одређену притисну силу на радни комад (Слика 2-28). Такође, током трансверзалног кретања алата, машина преко алата преноси силу која делује дуж x – осе (зато се назива x-сила) у правцу заваривања. Дејство ове силе оптерећује алат на савијање и утолико је већа уколико је брзина

заваривања већа. И величина ове силе, односно брзина заваривања, мора бити усклађена са расположивом опремом јер би у супротном превелики момент савијања могао изазвати деформацију и лом алата. Основни критеријуми за избор одговарајућег уређаја за заваривање су дебљина и врста материјала радног комада који се заварује.

Брзина заваривања је лимитирана дебљином комада који се заварује и обрнуто је пропорционална дебљини радног комада, односно што је дебљина комада већа брзина заваривања треба да је мања. Потребна брзина ротације алата зависи од врсте материјала који се заварује и геометрије алата.



Слика 2-28. Шематски приказ сила и правац њиховог деловања током заваривања FSW поступком [86].

2.3.5. Предности и недостаци поступка

Будући да се поступак заваривања трењем алатом одвија без топљења основног материјала, овим поступком је могуће заварити материјале који се иначе тешко заварују класичним поступцима са топљењем материјала, при чему се добија спој добрих механичких карактеристика који не захтева завршну обраду. Количина унете топлоте, настале трењем током заваривања је мала па изостају фазе топљења и очвршћавања чиме је избегнута опасност од појаве топлих прслина и порозности а истовремено је обезбеђена геометријска стабилност, односно минимално кривљење и витоперење завареног комада. На пример, алуминијумски лим дебљине 2,8 mm претрпи само 0,25 mm кривљења на дужини од 12 m метала

шава. Скупљање је такође минимално, тако да се плоча ширине 6 m, након заваривања скупила свега 2 mm [87,88]. Такође, избегнуто је и присуство укључака и нечистоћа у завареном споју. Укратко, може се рећи да су предности FSW поступка, у односу на класичне поступке са топљењем материјала, следеће:

- нема употребе додатног материјала,
- спој поседује добре механичке карактеристике,
- нема опасности од настанка топлих или хладних прслина,
- добра корозиона постојаност споја,
- завар је истих карактеристика по целој својој дужини,
- нема прекида у раду током извођења процеса (замена електрода и сл.),
- нема употребе заштитног гаса током извођења заваривања,
- чистији услови рада (нема појаве дима и штетних испарења),
- могућност заваривања у свим позицијама,
- уштеда енергије,
- нису потребни сертификовани заваривачи,
- није потребна припрема материјала (брушење, чишћење, обликовање споја),
- задовољавајућа издржљивост алата при заваривању материјала ниже чврстоће.

Поред наведених предности у односу на друге поступке заваривања, постоје и одређени недостаци као што су:

- комади који се спајају морају бити круто стегнути,
- неопходна је помоћна подлога за ослањање радног комада,
- на крају сваког шава присутна је излазна рупа, тзв. „*keyhole*“,
- захтев за различитим дужинама трна алата, у зависности од дебљине материјала који се заварују,
- велика потрошња алата при заваривању материјала високе чврстоће,
- за заваривање сложених 3D облика потребна је скупа опрема.

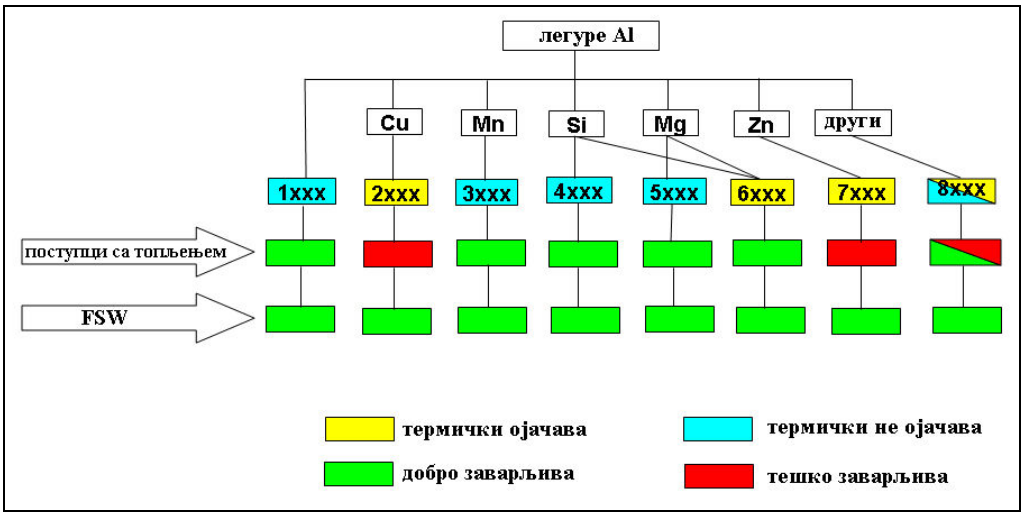
Присуство излазне рупе (*keyhole*) на крају завареног споја је нарочито велики проблем код заваривања цилиндричних посуда и резервоара, тј. када се заваривање врши по затвореној путањи. У циљу отклањања овог недостатака тим истраживача Маршал центра је успео да дизајнира алат са померљивим трном

дуж сопствене осе. На почетку заваривања трн се полако извлачи из ваљка и продире између две плоче које се заварују док се на крају процеса заваривања лагано увлачи у ваљак алата и елиминише постојање излазне рупе. Резултати испитивања су показали да се применом алата са померљивим трном добијају заварени спојеви са минималним деформацијама и веће затезне чврстоће [89].

2.3.6. Материјали заварљиви FSW поступком

Заваривање FSW поступком може се користити за спајање како истородних тако и разнородних материјала ако је испуњен услов да су материјал и конструкција алата такви да могу радити на температурама топле пластичне прераде материјала који се спајају [90]. Применом овог поступка могуће је успешно заварити све алуминијумске легуре (Слика 2-29) као и неке друге материјале, као што су:

- бакар и његове легуре,
- легуре олова,
- титанијум и његове легуре,
- легуре магнезијума,
- цинк,
- легуре никла,
- обични конструкциони челици,
- аустенитни и дуплекс челици,
- микролегирани челици,
- пластика.



Слика 2-29. Заварљивост алуминијумских легура у зависности од примењеног поступка [25,91].

2.3.6.1. Металуршке трансформације у FSW споју алуминијумских легура

Заваривање трењем алатом је термомеханички процес у коме се одвија механичка интеракција између алата и завариваних комада. Одигравањем ове механичке интеракције генерише се енергија неопходна за заваривање, деформише се структура и модификују механичке карактеристике завариваног материјала. Односно, као последица интеракције алата и завариваних комада, на месту генерисања топлоте јавља се термо-деформациони процес који проузрокује одговарајуће металуршке трансформације. Металуршке трансформације одређују карактер и особине завареног споја а зависе од врсте и стања легуре. Највећи утицај на металуршке трансформације имају брзина ротације, брзина заваривања и геометрија алата. Трансформације у легурама које таложно ојачавају (термички обрадиве легуре) су сложенијег карактера од трансформација у легурама код којих доминира растварајуће ојачавање (термички необрадиве легуре) [25,92].

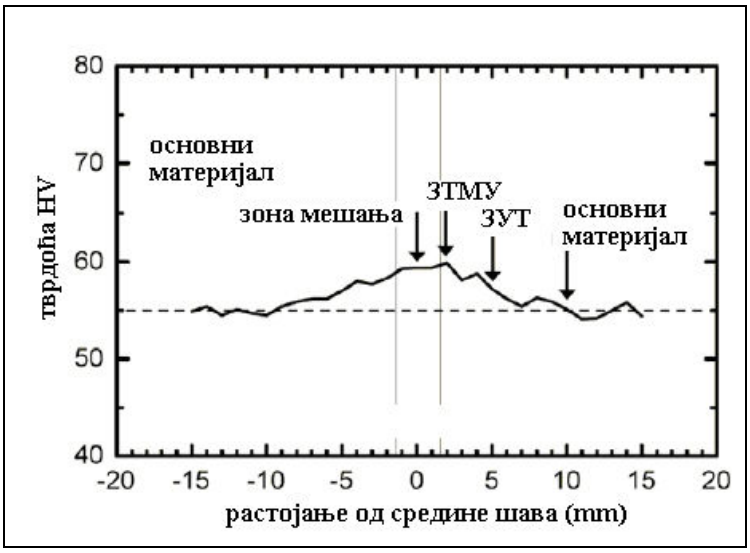
2.3.6.2. Расподела тврдоће

Легуре серије 5xxx (Al-Mg) спадају у термички нобрадиве легуре. Ако се радни комади ових легура налазе у жареном стању (5xxx-O), тврдоћа у области споја добијеног FSW поступком, је или иста тврдоћи основног материјала или је незнатно већа. Ово мало повећање тврдоће у односу на основни материјал, региструје се у ЗУТ-у, зони термо-механичког утицаја и грумена (Слика 2-30).

Највећа тврдоћа је у грумену, што је првенствено последица уситњавања зрна у овој области услед интензивног механичког мешања и повишене температуре. Густина дислокација у грумену је веома мала тако да је њихов утицај занемарљив. Материјал у ЗТМУ је изложен дејству и механичког мешања и повишене температуре па се добија структура са деформисаним зрнима и великом густином дислокација, услед чега ова зона има нешто већу тврдоћу од основног материјала. Материјал у ЗУТ-у није изложен механичком мешању већ само температури услед чега је структура измењена у односу на основни материјал. Густина дислокација је нешто већа него у основном материјалу али мања него у ЗТМУ па је и тврдоћа незнатно већа него у основном материјалу [14,93,94].

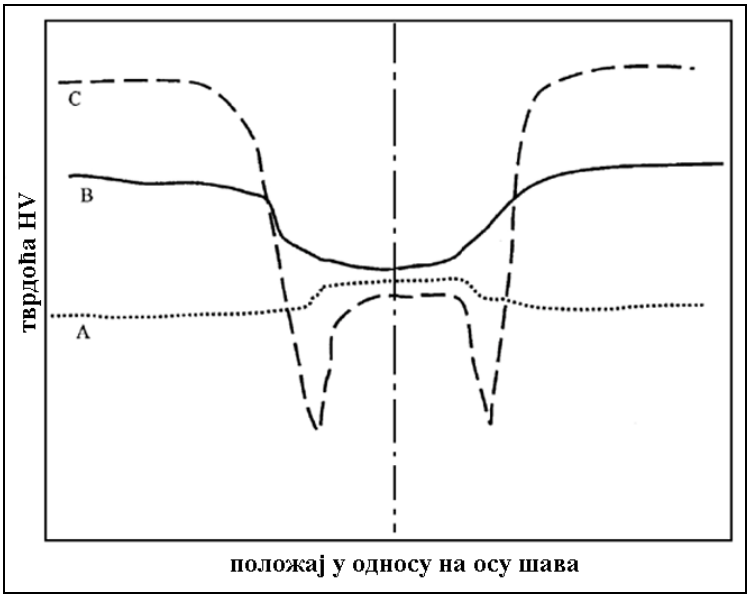
На ниво тврдоће и величину зрна, споја завареног FSW поступком, термички необрадивих легура серије 5ххх у жареном стању првенствено утичу параметри заваривања [37]:

- повећањем брзине заваривања смањује се величина зрна,
- повећањем брзине заваривања повећава се тврдоћа у зони мешања,
- повећањем брзине ротације повећава се величина зрна,
- повећањем брзине ротације смањује се тврдоћа,
- пречник ваљка алата има малог утицаја на тврдоћу и величину зрна,
- процес рекристализације зрна је интензивинији ако је већа брзина ротације, мања брзина заваривања и већи преченик ваљка алата, односно што је већа количина унете, тј. генерисане топлоте.



Слика 2-30. Расподела тврдоће кроз заварени спој легуре 5052-0 у жареном стању [68].

Са друге стране приликом заваривања претходно деформационо ојачаних легура ове серије (5xxx-H), тврдоћа у области споја је мања у односу на основни материјал. Пад тврдоће у области споја деформационо ојачаних легура је последица процеса отпуштања, до кога долази услед топлоте створене трењем током заваривања FSW поступком (Слика 2-31).



Слика 2-31. Шематски приказ расподеле тврдоће кроз попречни пресек споја: **A** – термички необрадиве легуре у жареном стању: незнатно повећање тврдоће у грумену; **B** – термички необрадиве легуре, деформационо ојачане: пад твдоће у грумену; **C** – термички обрадиве легуре, карактеристичан „W“ облик профила: најмања тврдоћа је у делу непосредно изван грумена [95].

При заваривању трењем алатом термички обрадивих алуминијумских легура серије 2ххх, 6ххх и 7ххх, које таложно ојачавају, у завареном споју и ЗУТ-у се одигравају комплексне металуршке трансформације [96-99]. Карактеристично за ове легуре је да у области грумена обично изостаје таложно ојачавање. Уколико и дође до издвајања талога у овој области, издвојене честице талога су веома фине. Са друге стране, у зони непосредно уз грумен настаје груб талог. Са повећањем удаљности од грумена смањује се и величина издвојених талога [100]. Овакав распоред талога је последица простирања топлоте кроз заварени комад и њен утицаја на микроструктуру материјала услед извршене термичке обраде. Услед тога расподела тврдоће кроз заварени спој легура које таложно ојачавају има карактеристичан „W“ облик профила (крива C на слици 2-31). Минимална тврдоћа одговара области непосредно изван грумена завара док је тврдоћа грумена на нивоу између основног и термички обрађеног материјала. Испитивањима на легурама 6063 и 7050 утврђено је да се услед старења, тврдоћа грумена повећава и да може достићи вредност основног материјала [95,96,101,102]. Радови Reynoldsa, Lindnera и Tanga на легури 7050, су показали да се разлика у тврдоћи између грумена и области минималне тврдоће може смањити променом параметара заваривања [103]. Велике брзине заваривања теже да повећају тврдоћу у целој зони заваривања. Са повећањем брзине заваривања, разлика у нивоу тврдоће расте јер велике брзине заваривања нарочито повећавају тврдоћу грумена док се тврдоћа ван грумена слабије мења.

2.3.7. Механичке карактеристике FSW споја алуминијумских легура

2.3.7.1. Затезне карактеристике

Према досадашњим сазнањима установљено је да области грумена и ЗУТ-а имају велику способност пластичне деформације, односно да највећи проценат издужења припада овим областима. Генерално говорећи, затезна чврстоћа FSW спојева алуминијумских легура се повећава са повећањем брзине ротације и нарочито брзине заваривања. Ефикасност споја, која представља однос затезне чврстоће завареног споја и основног материјала, веома зависи од типа легуре. Ефикасност спојева заварених FSW поступком је далеко већа од ефикасности

спојева заварених класичним поступцима са топљењем, нарочито када су у питању легуре серије 2xxx и 7xxx. За легуре серије 5xxx ефикасност споја може да износи и до 100%, док за легуре серије 2xxx, 6xxx и 7xxx ефикасност споја износи око 90%, 75% и преко 90%, респективно. При затезним испитивањима заварених спојева термички обрадивих легура (које таложно ојачавају), до лома углавном долази на повратној страни споја. Накнадна термичка обрада спојева има одређеног утицаја на место и карактер прелома и повећава ефикасности споја али истовремено знатно смањује савојну чврстоћу услед пораста зрна у ЗТМУ. Из ових разлога се накнадна термичка обрада спојева добијених FSW поступком не препоручује [22,47,50,104-108].

2.3.7.2. Енергија удара

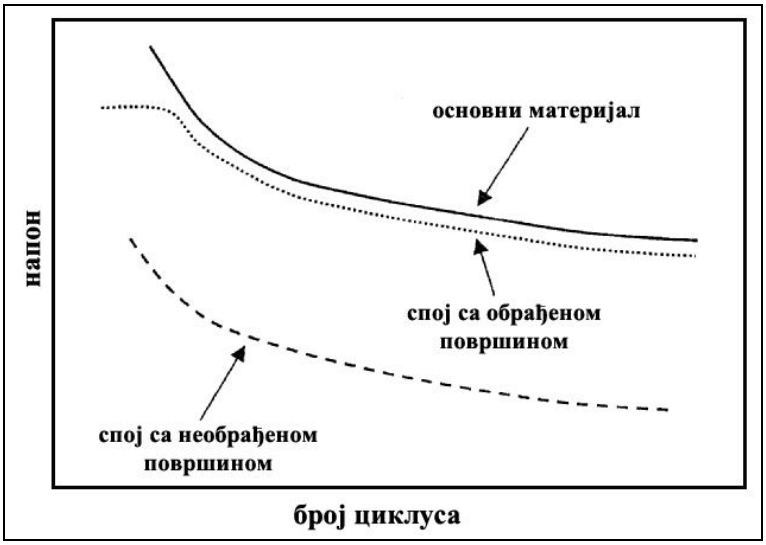
Података о жилавости споја завареног FSW поступком има јако мало. Нека спроведена испитивања указују да енергија удара завареног споја може да износи око 90% од енергије удара основног материјала [50,109,110]. Публиковани резултати упућују на то да су спојеви заварени FSW поступком супериорнији и односу на основни метал. Dawes је испитивао понашање FSW спојева легура 2014-T651, 7075-RRA и 5083-O и упоређивао са понашањем основног материјала [111]. Код легура 2014 и 7075 карактеристике завара су приближне, а сам спој је код обе легуре имао већу отпорност на раст прскотине него основни материјал. Код легуре 5083 разлике у понашању завара и основног материјала у присуству прскотине су мале. Sutton је на легури 2024-T351 испитивао отпорност FSW споја на раст прслине и закључио да основни материјал има мању отпорност на раст прскотине него завар [112]. Kroninger и Reynolds су на плочама легуре 2197-T8 дебљине 8,1 mm извршили упоредна испитивања отпорности споја добијеног FSW поступком и плазминим луком у присуству иницијалне прскотине. Код FSW споја иницијална прскотина је била позиционирана у грумену и ЗУТ-у на страни напредовања и повратној страни док је код споја добијеног плазма поступком, прскотина позиционирана у средини метала шава и у основном материјалу. Добијени резултати су показали да је спој добијен FSW поступком далеко отпорнији на пропагацију прскотине у односу на основни материјал док је спој остварен плазминим луком имао мању отпорност од основног материјала. Разлог

за ово није сам пад тврдоће у споју, јер метал шава споја добијен плазминим луком има знатно нижу тврдоћу од основног материјала. Објашњење оваквог различитог понашања ова два споја највероватније лежи у непостојању кртих продуката заваривања код FSW поступка [113].

2.3.7.3. Замор

Испитивања замарањем спојева добијених FSW поступком показала су да на отпорност споја на замор великог утицаја има квалитет, односно изглед лица завара. Већина доступних података о замору FSW спојева приказана је у облику S-N криве Наиме, испитивањем циклирањем FSW споја легуре 2024-T3 у попречном и подужном правцу, утврђено је да отпорност споја на замор износи свега 50% од отпорности основног материјала. Међутим, када се са лица завара машински скине слој дебљине 0,10 до 0,15mm, отпорност споја на замор је приближно једнака основном материјалу (Слика 2-32) [114-116]. Ово се објашњава чињеницом да код споја који није машински обрађен, мало надвишење на страни напредовања и присутни полукружни трагови ваљка алата представљају места концентрације напона на којима се стварају и развијају заморне прскотине. У случају када је лице споја машински обрађено (уклоњени концентратори напона) до образовања заморне прскотине долази у области најмање тврдоће. Утврђено је да спојеви заварени при већим брзинама заваривања имају бољу отпорност на замарање. Наведено је доведено у везу са чињеницом да заварени спојеви добијени при већим брзинама заваривања имају већу тврдоћу у областима минималне тврдоће. Magnusson и Kallman су исти ефекат утицаја површинске обраде лица споја уочили код легура 2024-T3, 7475-T76 и 6013-T6 [50]. Kumogai је упоређујући отпорност према замарању за основни материјал, FSW спој и спој заварен MIG поступком утврдио да је отпорност FSW споја испод нивоа основног материјала, али знатно боља него код метала шава добијеног MIG поступком [117-119]. Генерално се може рећи да динамичка чврстоћа FSW спојева зависи од концентрације напона и постојања области са минималном тврдоћом. Испитивања показују да ефекти концентрације напона могу бити елиминисани машинском обрадом након заваривања. Области са минималном тврдоћом не могу бити

елиминисане али се ниво тврдоће у њима може контролисати правилним избором параметара заваривања, пре свега повећањем брзине заваривања [120].



Слика 2-32. Шематски приказ утицаја обраде површине споја на отпорност према замарању и поређење са основним материјалом [14].

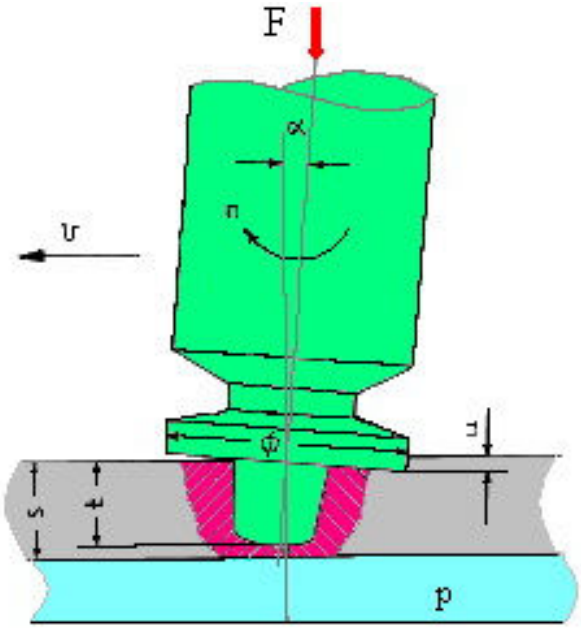
2.3.7.4. Заостали напони

Ефекат који до пре неколико година није био пажљиво испитиван је заостали напон у FSW споју. Заостали напони и деформације које се јављају у спојевима добијеним FSW поступком су далеко мањи од оних који се јављају у спојевима добијеним топљењем материјала. Међутим, треба тежити да се ови напони сведу на минимум, што се може постићи правилним избором параметара заваривања и облика алата. Доминантни ефекат у дефинисању нивоа заосталог напона је неуниформно загревање и хлађење, што изазива неједнако ширење материјала и локалне пластичне деформације. Карактеристично за FSW поступак је да се хлађење материјала након заваривања одвија у специфичним условима услед фиксираности радног комада стезним прибором. Последице које произилазе из оваквих услова хлађења утичу на заостале напоне али нису такве да могу довести до промене опште форме напонског стања. Са друге стране, сама примена алата за заваривање знатно модификује напонско стање завариваних комада. Наиме, услед присуства притисне силе долази до сабијања завариваног материјала у вертикалном правцу и његовог ширења у хоризонталном. Присуство торзионих оптерећења изазива асиметричну дистрибуцију напона. Ротациона сила на страни

напредовања имаја тенденцију да повлачи материјал чиме проузрокује сабијање материјала на повратној страни услед чега се јавља додатни притисак у том делу. Ситуацију додатно компликује што се поменуте модификације напонског стања дешавају на повишеним температурама, које са своје стране изазивају ширење материјала. На тај начин се додатно, услед термичког ширења, модификује напонско стање споја [121-123]. Истраживања су показала да заостали напони могу имати доминантан утицај на настанак и раст прскотине у споју. Утврђено је да вредност заосталог напона FSW споја легуре 2024-T3 износи од 75 до 105 MPa [83] а за легуру 7108-T79 чак 140 MPa [124].

2.3.8. Параметри заваривања

За правилно извођење процеса заваривања и добијање завареног споја задовољавајућег квалитета неопходно је познавати и међусобно усагласити процесне параметаре, алат и уређај на коме се заваривање изводи. Израда заварених спојева зависи од избора и контроле више утицајних параметара као и карактеристика материјала који учествују у процесу заваривања (Слика 2-33) а промена ових параметара утиче на брзину и количину генерисане топлоте, температурно поље, обртни момент и снагу. Температура расте са повећањем брзине ротације и притисне силе а лагано опада са повећањем брзине заваривања [125-128].

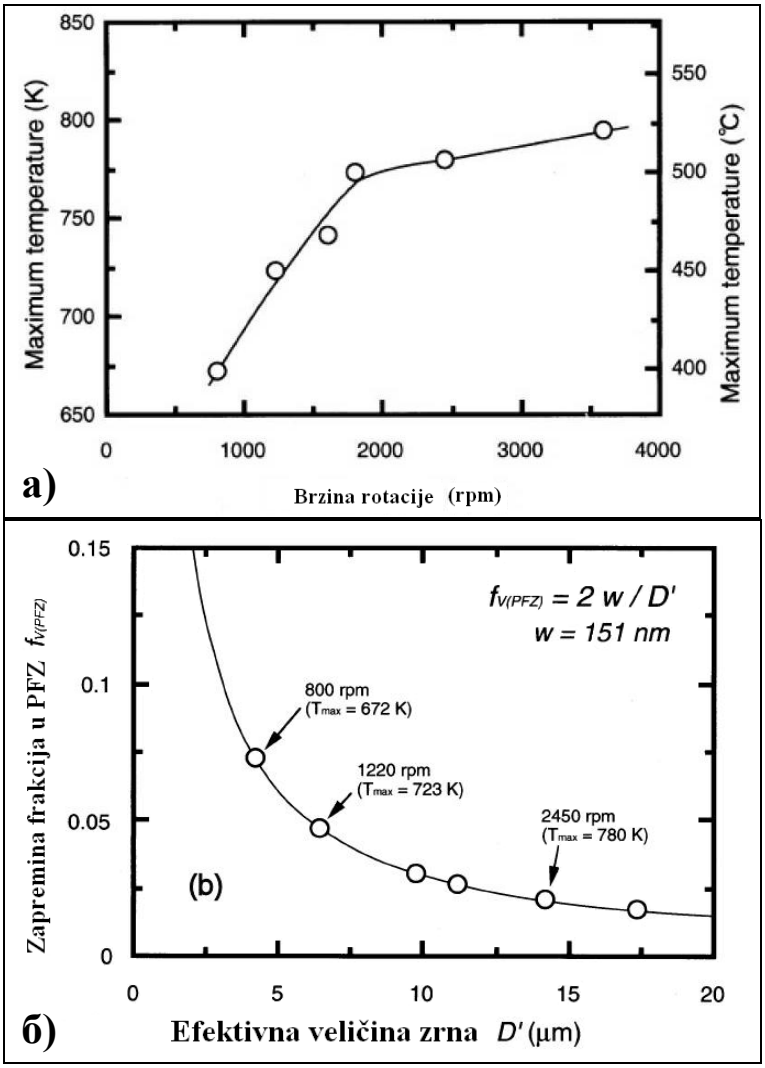


Слика 2-33. Параметри и карактеристике од значаја за добијање квалитетног завареног споја: **n** – брзина ротације алата; **V** – брзина заваривања; **F** – притисна сила; **α** – угао нагиба алата; **Ø** – пречник ваљка алата; **y** – дубина утискивања ваљка; **t** – дубина продирања трна; **s** – дебљина радног комада; **p** – потпорна плоча [68].

Од наведених параметара највећи утицај на процес заваривања имају брзина ротације алата, брзина заваривања, притисна сила у z-правцу, угао нагиба алата као и геометрија алата [34,46,129-132]. Вредности ових параметара највише зависе од дебљине радних комада и карактеристика материјала који се заварује. За сада се њихове оптималне вредности одређују искључиво експериментално.

2.3.8.1. Брзина ротације алата

Брзина ротације алата током заваривања је константна а креће се у широком опсегу од 100 до 4000 obr/min. Број обртаја дефинише величину периферне брзине алата (трна и ваљка) која има важну улогу у процесу генерисања топлоте. Повећањем брзине ротације повећава се количина генерисане топлоте а самим тим расте и максимална температура циклуса заваривања услед чега долази до повећања величине зрна (Слика 2-34).



Слика 2-34. Утицај брзине ротације на температуру и величину зрна: **а)** пораст температуре са повећањем брзине ротације; **б)** однос величине зрна и запреминског удела зоне без талога [130].

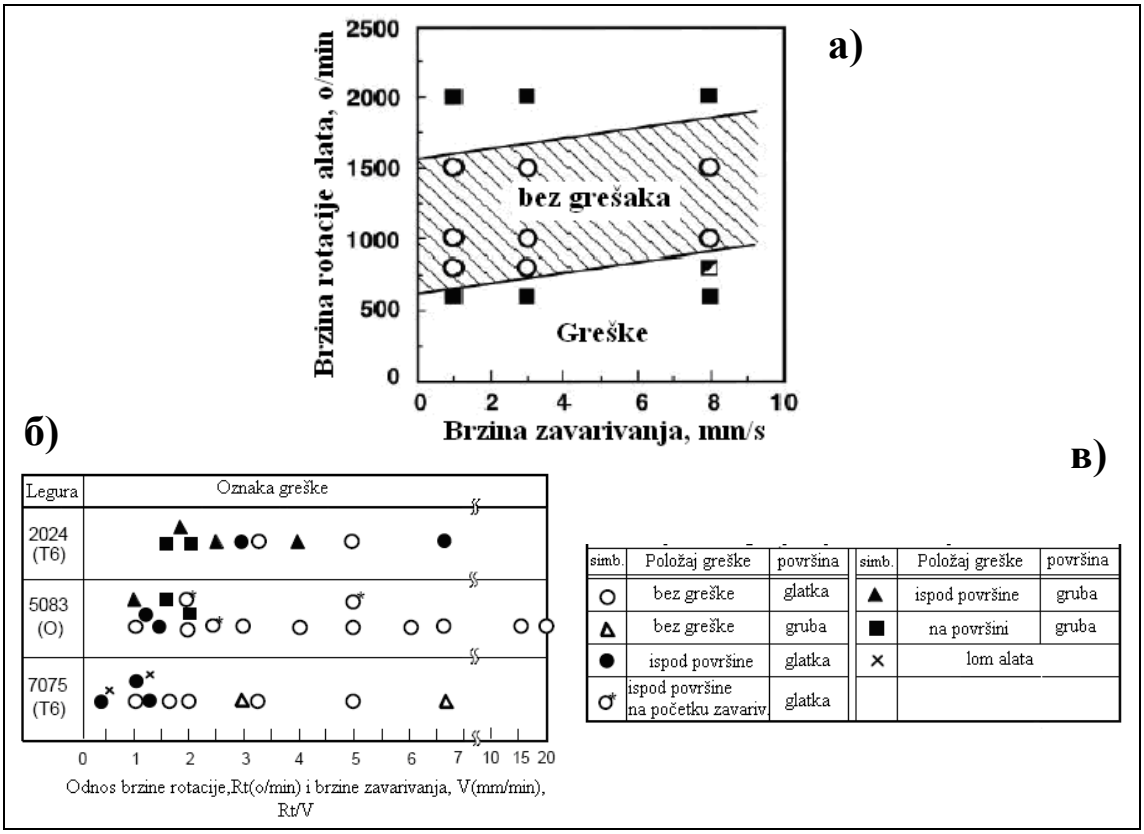
2.3.8.2. Брзина заваривања

Брзина заваривања у својој суштини представља транслаторну брзину кретања алата и има константну вредност током процеса заваривања. Избор брзине заваривања зависи од дебљине завариваног материјала и може се рећи да је обрнуто пропрционална дебљини завариваног комада, односно што је дебљина комада већа, брзина заваривања треба да је мања. Са друге стране, брзина заваривања зависи и од механичких карактеристика завариваног материјала. На пример, код чистог алуминијума дебљине 2 mm, брзина заваривања је 200 cm/min, док код високо квалитетних легура исте дебљине износи свега 12,7 cm/min. Брзина заваривања се оквирно може одредити из односа V/ωR, где је V –

транслаторна брзина, R – полупречник трна алата и ω – угаона брзина трна, при чему треба да је испуњен услов да је однос V/ωR у распону од 0,01 до 0,02. Превелика брзина заваривања може изазвати појаву грешке типа тунела или непровара на кореној страни [129,131].

2.3.8.3. Однос брзине ротације и заваривања

На основу великог броја експерименталних истраживања, установљено је да је за добијање квалитетног FSW споја неопходно установити оптималан однос брзине ротације и брзине заваривања - V_{rot}/V_{zav}. Однос V_{rot}/V_{zav} указује да ли је за дате параметре заваривања могуће добити спој без присуства грешака (Слика 2-35) а на основу његове вредности могу се оријентационо претпоставити карактеристике споја [47,68,85,133-135].



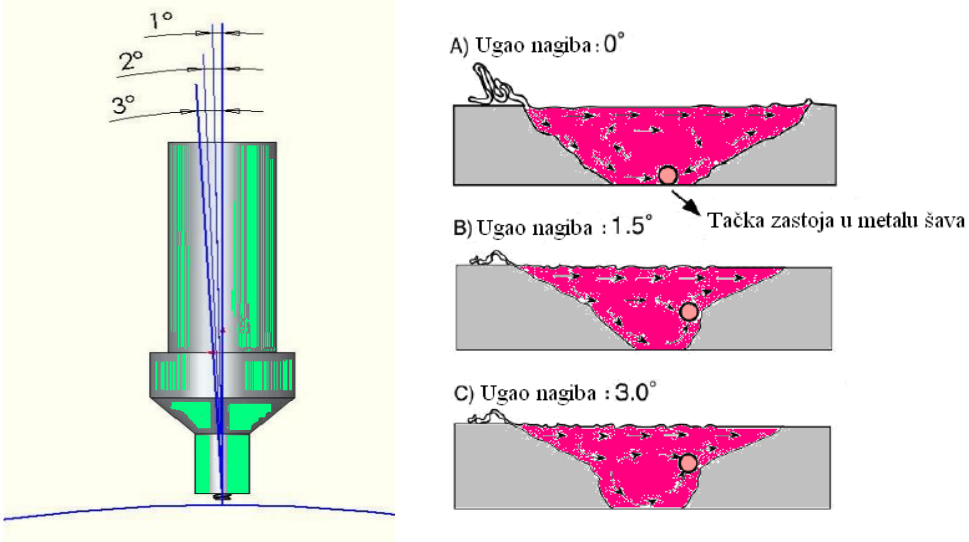
Слика 2-35. Утицај односа V_{rot}/V_{zav} на: **а)** појаву; **б)** положај грешке у завареном споју; **в)** значење симбола [47,68,85].

2.3.8.4. Притисна сила алата

Притисна сила алата делује у вертикалном правцу на радни комад. У односу на класичан поступак заваривања трењем, величина притисне силе код FSW поступка је много мања и износи од 2 до 200 kN. Повећањем притисне силе брже се постиже максимална температура заваривања. Прекомерно повећање силе изазива истискивање омекшалог материјала изван зоне заваривања, што за последицу има стањење споја. На ово се донекле може утицати конструкцијом алата, првенствено чела ваљка алата – алат са тзв. резервоаром односно удубљеним челом ваљка. Са друге стране, ако је притисна сила недовољна постоји опасност од појаве грешке типа тунела [68,91,136,137].

2.3.8.5. Угао нагиба алата

Угао нагиба алата представља закошење алата у односу на вертикалну осу. Од његове величине зависи позиција тачке застоја која представља пресек примарног и секундарног течења материјала (Слика 2-36). Са повећањем угла нагиба алата, транспорт омекшалог материјала се одвија равномерније, његово умешавање је боље а смањује се и сила у x-правцу (правцу заваривања) јер бочна површина ваљка алата не задире у заваривани материјал приликом транслаторног кретања. Са друге стране, превелики угао може проузроковати појаву гребена на лицу споја [85,131,138,].



Слика 2-36. Позиција тачке застоја у зависности од величине нагибног угла алата [85,138].

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РАД

3.1. ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛНОГ РАДА

Рад на експерименталном делу истраживања састојао се из две фазе и обухватао је активности везане за овладавање технологијом заваривања трењем алатом, добијање квалитетног завареног споја без грешака и његову карактеризацију. Спроведене активности имале су за циљ имплементацију и потврду теоријских навода, практично упознавање са карактеристикама и феноменима процеса, дефинисање оптималне геометрије алата, избор параметара заваривања и анализу кумулативног утицаја свих процесних параметара на карактеристике завареног споја.

На основу стечених теоријских сазнања извршено је прилагођавање постојеће опреме захтевима FSW процеса, избор материјала за израду алата и помоћног алата (потпорне плоче) као и израда истих.

Након одабира материјала алата, дефинисања почетних геометрија алата и израде истих, приступило се извођењу експерименталних заваривања.

Како у нашој земљи до сада нису вршена експериментална заваривања FSW поступком, неопходно је било извршити прелиминарна испитивања ради упознавања са карактеристикама и феноменима процеса, сагледавања утицаја процесних параметара и геометријских карактеристика алата на могућност добијања споја и његове карактеристике. Из тог разлога експериментални рад је подељен на две фазе:

У првој фази експерименталног рада за заваривање је одабрана добро заварљива алуминијумска легура серије 5xxx - AlMg2,5 (5052-H32). Да би се оценио утицај геометријских карактеристика алата и унете енергије на могућност добијања квалитетног завареног споја и понашање материјала (како завариваног тако и алата) током заваривања, експериментисано је са алатима различитих геометрија и различитим параметрима заваривања. Извршена су механичка и структурна

испитивања добијених заварених спојева а након сагледавања и анализе добијених резултата приступило се другој фази експерименталног рада.

У другој фази експерименталног рада за заваривање је одабрана тешко заварљива алуминијумска легура високе чврстоће серије 2xxx - AlCu4,5Mg (2024-T351). Заваривање ове легуре класичним поступцима са топљењем је веома тешко изводљиво и оптерећено многим проблемима те је стога примена FSW поступка за заваривање ове легуре веома интересантно. Ово и јесте разлог који је определило да се за главни циљ истраживања за заваривање одабере широко примењивана алуминијумска легура ознаке 2024 из серије 2xxx. Добијени заварени спојеви подвргнути су структурним, механичким и корозионим испитивањима.

Експериментална заваривања, израда, припрема и испитивања узорака спроведени су у лабораторијама Војнотехничког института, Сектора за материјале и заштиту у Одељењу за металне материјале и Техникиму Барич. Алати за заваривање израђени су у ГОША – ФОМ, а потпорна плоча (помоћни алат) у прототипској радионици Одељења за металне материјале.

3.2. МАТЕРИЈАЛ

3.2.1. Основни материјал

Заваривање је спроведено на две алуминијумске легуре из два система легирања - 5xxx и 2xxx. Заварене су легуре 5052-H32 и 2024-T351. Хемијски састав основних материјала одређен је методом рендгенске флуоресцентне спектрометрије на уређају PHILIPS-PW1404 и дат је у Табели 3.1.

Табела 3.1. Хемијски састав завариваних алуминијумских легура (mas%).

легура	**садржај елемента (mas%)**									
	Cu	**Mg**	**Mn**	**Fe**	**Zn**	**Si**	**Ti**	**Zr**	**Ni**	**Cr**
2024	4,70	1,56	0,65	0,17	0,11	0,046	0,032	0,011	0,006	0,004
2024*	4,52	1,60	0,65	0,28	0,09	0,12	0,16	0,009	0,02	≤0,01
5052	0,02	2,25	0,12	0,27	0,03	0,12				0,2

*према сертификату $N^0$47831 произвођача ALCOA [139].

У Табели 3.2 дате су средње вредности механичких карактеристика и тврдоће основних материјала. Механичке карактеристике одређене су на затезним епруветама са паралелним боковима израђеним према стандарду ASTM E-8M [140]. Испитивање је спроведено према стандарду SRPS EN 10002-1 на хидрауличној кидалици Amsler SZBDA 599 опсега 200 kN и на инстументираној механичкој кидалици ZWICK опсега 50 kN [141]. Тврдоћа је мерена методом Vickers HV3, према стандарду SRPS C.A4.030, на уређају за испитивање тврдоће Wolpert [142].

Табела 3.2. Механичке карактеристике основних материјала – средње вредности.

легура	**$Rp_{0,2}$ (MPa)**	**Rm (MPa)**	**A_5 (%)**	**HV3**
2024	370	481	17,9	145
2024*	270	410	22	
5052	175	232	21,8	75

*према сертификату $N^0$47831 произвођача ALCOA

3.2.2. Материјал алата

За израду алата за заваривање коришћени су челици Č.1531, Č.4830 и Č.5742 у којима садржај угљеника износи од 0,45 до 0,55%. Хемијски састави одабраних челика за израду алата дати су у Табели 3.3. Након израде, алати су термички обрађени на тврдоћу од 50 до 60 HRc.

Челик Č.1531 има просечну тврдоћу у каљеном стању 58HRc и врло малу прокаљивост. Отпоран је према хабању после површинског каљења. Није подложан отпусној кртости. У експерименту је коришћен због широке распрострањености и лаке обрадивости.

Челик Č.4830 има просечну тврдоћу у каљеном стању 61HRc и подложан је отпусној кртости. Отпорност према хабању је добра, посебно после површинског каљења.

Челик Č.5742 (56NiCrMoV7) спада у групу нисколегираних алатних челика за рад у топлом стању до 600^0. Комерцијални назив овог челика је UTOP EXTRA 2. Одлично подноси динамичка и ударна оптерећења. Услед повећаног садржај Mo и V има побољшану отпорност на хабање а поседује и добру прокаљивост,

чврстоћу, тврдоћу и задовољавајућу жилавост на повишеним температурама. Тврдоћа на температури од 500^0C износи око 55HRC, уз повећану постојаност против попуштања.

Потпорна плоча (помоћни алат) израђена је од аустенитног нерђајућег челика ознаке Č.4572 (X6CrNiTi18/10). Нерђајући челик, као лош проводник топлоте, одабран је за израду потпорне плоче да би се током извођења заваривања минимализовало одвођење створене топлоте из завареног споја, односно да би губици топлоте били што мањи а термичка ефикасност процеса што већа.

Табела 3.3. Хемијски састав челика одабраних за израду алата.

челик	**намена**	**садржај елемента (mas%)**								
		C	**Si**	**Mn**	**P**	**S**	**Cr**	**Mo**	**Ni**	**V**
Č.1531	алат за заваривање	0,45	0,035	0,65	0,021	0,018	/	/	/	/
Č.4830		0,50	0,29	0,95	0,019	0,015	0,11	/	/	/
Č.5742		0,54	0,38	0,68	0,017	0,012	1,07	0,46	1,71	0,17
H13*		0,38	1,00	0,38	≤0,030	≤0,020	5,15	1,35	/	1,00
Č.4572	потпорна плоча	0,10	1,00	2,00			18,0		10,0	

*литературно препоручени материјал за израду алата за FSW

3.3. ОПРЕМА ЗА ЗАВАРИВАЊЕ

3.3.1. Уређај за заваривање

Конструкција машине мора да обезбеди могућност адекватног и поузданог стезања плоча које се заварују, довољну силу притиска на узорке, стационарност, регулацију броја обртаја и контроле кретања алата дуж линије додира узорака који се заварују итд. За експериментална заваривања одабрана је алатна глодалица Првомајска АЛГ–200 (Слика 3-1) са снагом електромотора за погон кретања главног вертикалног вретена од 4 kW и излазним бројем обртаја од 1400 obr/min, инсталирана у Одељењу за металне материјале Војнотехничког института. Глодалица има могућност степенасте регулације броја обртаја преко мењачке кутије у распону од 300 до 1900 obr/min и брзине посмака од 7 до 380 mm/min. У Табели 3.4 дате су могуће брзине ротације и посмака глодалице АЛГ-200. Брзина

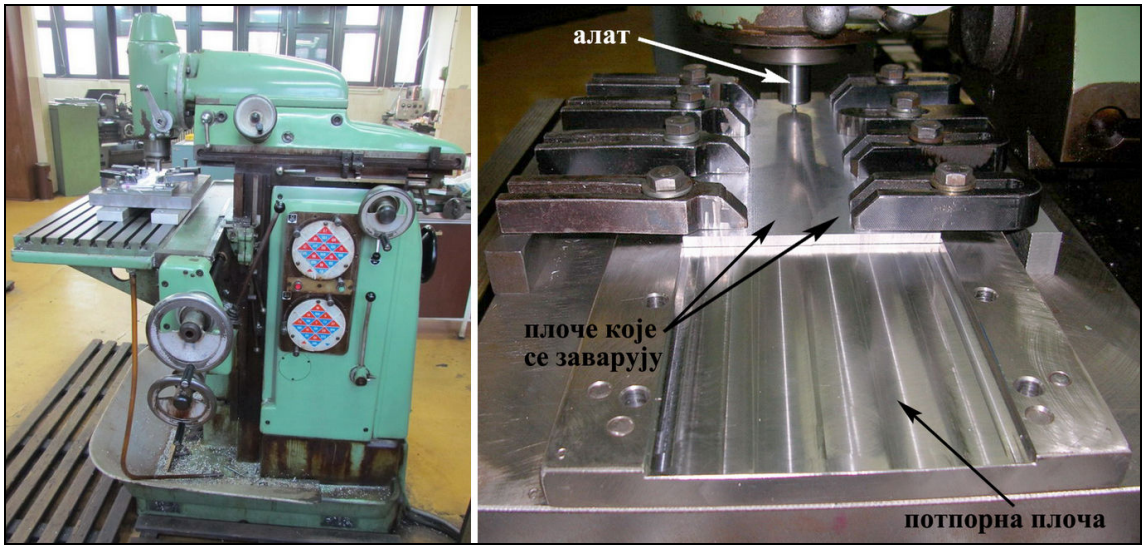
посмака за спроведена експериментална заваривања представља брзину заваривања.

Табела 3.4. Могуће брзине ротације и посмака на глодалици АЛГ-200.

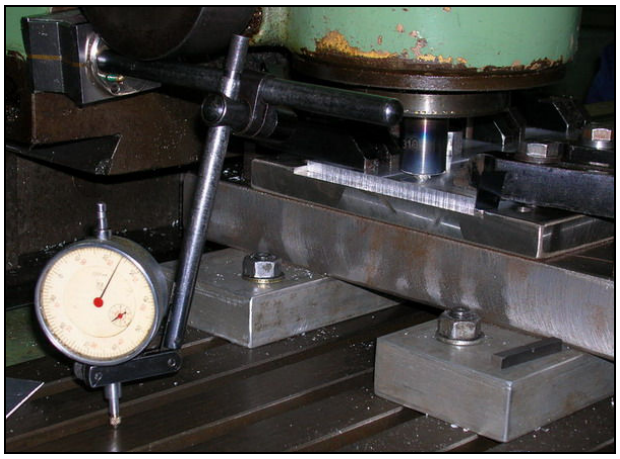
Брзина ротације (o/min)			**Брзина посмака (заваривања) (mm/min)**					
300	600	1180	7	14	29	58	116	235
375	750	1500	9	18	37	73	150	300
450	950	1900	11	23	46	93	190	380

Прилагођавање глодалице захтевима процеса заваривања извршено је једино у смислу обезбеђивања неопходног поузданог стезања узорака који се заварују.

Недостатак коришћене глодалице, је што није постојала могућност мерења и праћења притисне силе, тј. силе у вертикалном правцу дуж z – осе. Овај проблем је делимично превазиђен континуалним мерењем дубине урањања трна алата у основни материјал и положаја чела ваљка алата у односу на површину завариваних узорака. Мерење је вршено постављањем контактног микрометра (компаратера) на носач главе у коју је стегнут алат за заваривање и контролом промене растојања у односу на сто глодалице (Слика 3-2). На овај начин контролисано је да ли током заваривања долази до промене положаја алата дуж z – осе.



Слика 3-1. Алатна глодалица АЛГ-200 прилагођена за FSW поступак заваривања.

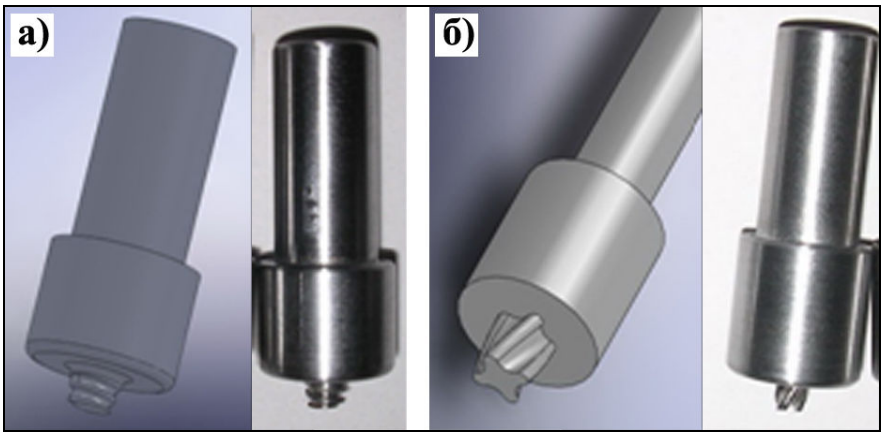


Слика 3-2. Контрола положаја алата дуж z – осе током заваривања.

3.3.2. Алат за заваривање

Како су информације у литератури о геометријским карактеристикама и конструкцији алата углавном штуре и без залажења у детаље, коришћени алати за експериментална заваривања су пројектовани на основу интуитивног концепта уз имплементацију доступних података неких аутора. Такође, коришћена су и лична искуства стечена током извођења заваривања великог броја проба, урађених у оквиру овог експерименталног истраживања. Поред тога, у обзир је узета и могућности израде пројектованих алата на доступним машинама.

Полазна основа у конструкцији алата били су алат А1 са трном конусног облика и нарезаном завојницом (Слика 3-3а) и алат А2 са цилиндричним трном и четири урезана спирална жљеба (Слика 3-3б).



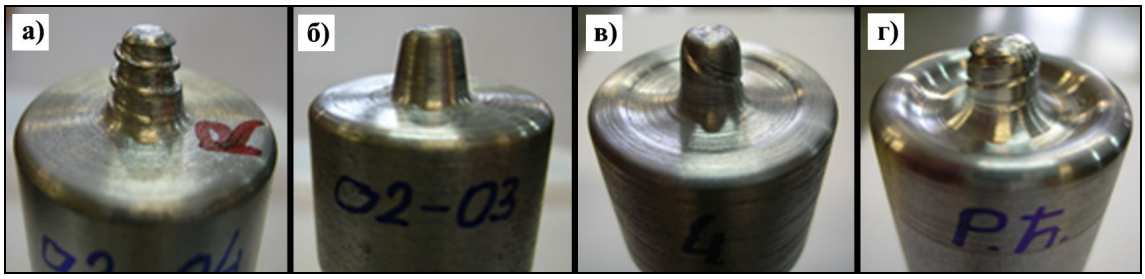
Слика 3-3. Модел и изглед полазних конструкција алата: а) алат А1 са трном конусног облика и нарезаном завојницом; б) алат А2 са цилиндричним трном и четири спирална жљеба.

Током експеримента моделовано је и израђено укупно 23 варијанти алата различите геометрије и конструкције. Код свих алата пречник ваљка износио је 25,0 mm. Дужина трна алата износила је 6,0 и 5,5 mm, у зависности од дебљине завариваног основног материјала. Чело ваљка алата има равну или конкавно профилисану површину, тзв. „резервоар“ (Слика 3-4). Запремина, облик и простирање резервоара су такође варирани. Запремина резервоара је износила од 50% до 100% запремине трна алата. Облик резервоара зависи од његовог положаја на површини чела ваљка. Резервоар је сконцентрисан или око трна алата или равномерно распоређен по целој површини чела ваљка. Ивица чела ваљка алата је заобљена на свим алатима. Трн алата је цилиндричног или конусног облика (угао конуса износио је 5^0, 10^0 и 20^0) са глатком површином или спиралном завојницом (Слика 3-4). Геометријске карактеристике завојнице (корак, смер, облик) и њихов број на трну су такође варирани. Завојнице су профилисане или као навој или као жљеб са левим или десним смером. Број завојница на трну износи 1 или 2. Ивице завојница су са радијусима ка прелазу на чело ваљка алата и површину трна. Код једног алата израђена је и завојница са облим навојем. Угао навоја, тј. корак завојнице износио је 5^0, 10^0, 15^0, 20^0 и 25^0. Врх трна алата је са равном површином, паралелан површини чела ваљка или са радијусом у облику калоте. На појединим алатима, на врху калоте унакрсно су урезана два жљеба димензија 1x1 mm.

Група алата израђена од челика Č.1531 и Č.4830 коришћена је за анализу утицаја конструкције, материјала и степена обраде алата на квалитет завареног споја при различитим параметрима заваривања, а у циљу дефинисања оптималне геометрије алата и параметара заваривања. На основу остварених резултата и регистрованих запажања, дефинисано је 5 алата оптималне геометрије (Слика 3-5). Ови алати су израђени од челика Č.5742 и термички обрађени на тврдоћу 50HRc.

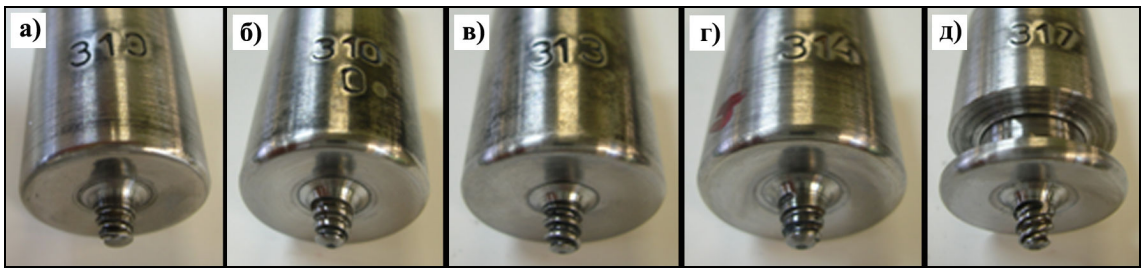
Режим примењене термичке обраде алата од челика Č.5742:

- предгревање са пећи на 600^0C, време држања 30 min,
- загревање до 850^0C, време држања 10 min,
- каљење у уљу,
- отпуштање на 400^0C, време држања 60 min,
- хлађење на ваздуху.

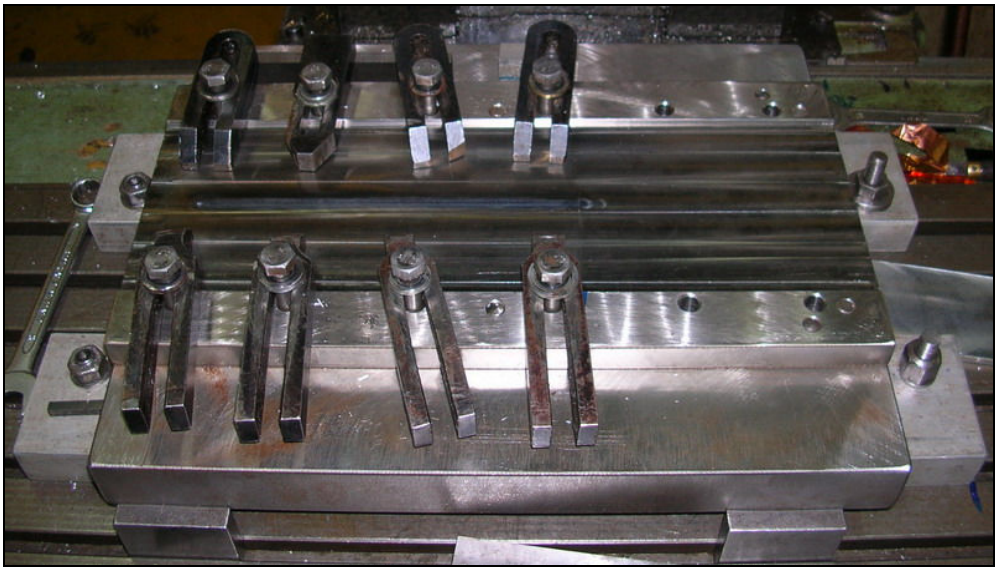


Слика 3-4. Пример алата са равним (а и б) и профилисаним челом ваљка (в и г).

Помоћни алат (потпорна плоча) има димензије 400x200x25 mm (Слика 3-6). Машински је обрађена тако да дуж целе горње површине има жљеб ширине $130^{+0,2}$ mm и дубине 4 mm. Жљеб је израђен јер обезбеђује лакше и поузданије стезање радних комада током заваривања. Такође, на обе стране плоче, целом њеном дужином, на одређеним међусобним растојањима урађени су функционални отвори који омогућавају везивање и фиксирање потпорне плоче за покретни сто глодалице.



Слика 3-5. Изглед алата израђених од челика Č.5742.



Слика 3-6. Изглед потпорне плоче.

3.4. ЗАВАРИВАЊЕ

Све пробе заваривања су изведене на алатној глодалици прилагођеној потребама процеса заваривања трењем мешањем помоћу алата (Слика 3-1). У зависности од фазе експерименталног рада, заваривани су плочасти узорци димензија 200x65x7 mm у првој односно 260x65x6 mm у другој фази. При томе је дужина оствареног завареног споја код сваке појединачне пробе износила око 150 односно 210 mm, респективно. Постављањем узорака у жљеб помоћног алата, извршено је њихово међусобно приљубљивање и остварен „I“ облик споја. Узорци су пре отпочињања заваривања круто стегнути за потпорну плочу која је везана за помични сто глодалице. Бочне површине узорака су машински поравнате а остале површине нису обрађиване.

Укупно је заварена 101 проба, од чега 41 у првој и 60 у другој фази експерименталног рада. Параметри заваривања, брзина ротације алата (V_{rot}) и брзина заваривања (V_{zav}), варирани су у широком опсегу од 450 до 1500 obr/min односно од 23 до 380 mm/min, респективно, при чему је однос брзине ротације и брзине заваривања (V_{rot}/V_{zav}) износио од 3,16 до 51,30 (Табела 3.5). Угао нагиба алата у односу на вертикалу износио је 1 и 2^0.

Сва заваривања изведена су према технолошким фазама процеса заваривања наведеним у Табели 3.6, а неке од њих су илустроване Сликом 3-7.

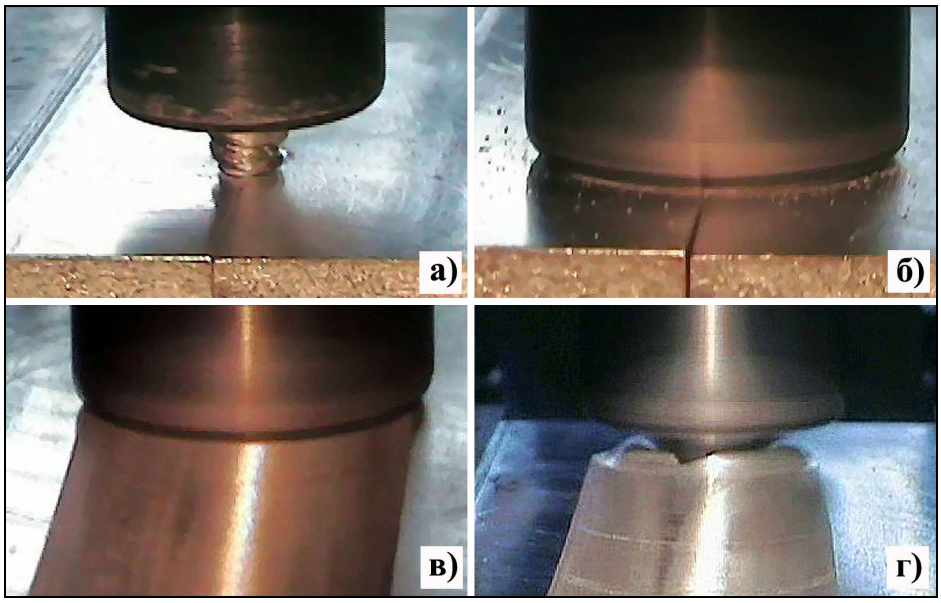
Табела 3.5. Коришћени односи брзина ротације и заваривања (Vrot/Vzav).

V_{rot} (obr/min)	V_{zav} (mm/min)												
	23	**29**	**37**	**46**	**58**	**73**	**93**	**116**	**150**	**190**	**235**	**300**	**380**
450					7,76								
600						8,22	6,45	5,17		3,16			
750					12,93	10,27	8,06	6,46	5,00				
950			25,67	20,65	16,38	13,01	10,21	8,19	6,33	5,00			
1180	51,30	40,69		25,65	20,34	16,16	12,69	10,17	7,87				
1500				32,60	25,86	20,54		12,93	10,00		6,38	5,00	3,94

*засенчени су односи при којима су добијени коректни спојеви без грешака

Табела 3.6. Технолошке фазе процеса заваривања.

припрема	1. одабир и постављање алата у машину. 2. избор и подешавање нагиба угла алата. 3. избор брзине ротације (V_{rot}) и брзине заваривања (V_{zav}). 4. задавање ротационог кретања алату.
заваривање	5. остваривање контакта између трна алата и узорка који се заварује (Слика 3-7а) 6. продирање трна алата у узорак до момента остваривања контакта између чела ваљка алата и узорка (Слика 3-7б). 7. кратко задржавање алата у месту. 8. задавање транслаторног кретања алату (Слика 3-7в).
крај	9. прекидање транслаторног кретања. 10. вертикално извлачење алата из узорка (Слика 3-7г). 11. заустављање ротационог кретања алата.



Слика 3-7. Фазе процеса заваривања; а) контакт трна алата и узорка; б) контакт чела алата и узорка – кратко задржавање алата у месту; в) заваривање – транслаторно кретање алата; г) извлачење алата из узорка.

3.4.1. Заваривање легуре 5052-H32

У овој фази експерименталног рада заваривани су плочасти узорци алуминијумске легуре 5052-H32, димензија 200x65x7 mm. Укупно је заварена 41 проба. Током ове фазе експерименталног рада вршене су корекције геометрије алата уз варирање параметара заваривања и угла нагиба алата. Параметари заваривања (V_{rot} и V_{zav}) коришћени у овој фази експерименталног рада, кретали су се од 450 до 1500 obr/min односно од 37 до 380 mm/min, респективно, при чему је

однос V_{rot}/V_{zav} износио од 3,16 до 32,60 (Табела 3.7). Угао нагиба алата износио је 1^0 и 2^0. За заваривање је коришћено 8 модела алата израђених од челика Č.1531 са цилиндричним и конусним трном (Слика 3-3).

Табела 3.7. Параметри заваривања легуре Al 5052 и однос Vrot/Vzav.

V_{rot} (obr/min)	V_{zav} (mm/min)												
	23	**29**	**37**	**46**	**58**	**73**	**93**	**116**	**150**	**190**	**235**	**300**	**380**
450					7,76								
600						8,22	6,45	5,17		3,16			
750							8,06	6,46					
950			25,67	20,65	16,38	13,01	10,21	8,19	6,33				
1500				32,60	25,86	20,54		12,93	10,00		6,38	5,00	3,94

*засенчени су односи при којима су добијени коректни спојеви без грешака

3.4.2. Заваривање легуре 2024-T351

У овој фази експерименталног рада заваривани су плочасти узорци алуминијумске легуре 2024-T351, димензија 260x65x6 mm. Укупно је заварено 60 проба. Заваривање у другој фази експерименталног рада изведено је у четири серије (Табела 3.8). Током ове фазе експерименталног рада, такође су вршене корекције геометрије алата уз варирање параметара заваривања. Поред тога, мењан је и материјал алата. Параметари заваривања (V_{rot} и V_{zav}) коришћени у овој фази експерименталног рада, кретали су се од 750 до 1180 obr/min односно од 23 до 190 mm/min, респективно, при чему је однос V_{rot}/V_{zav} износио од 5,00 до 51,30 (Табела 3.9). Угао нагиба алата износио је 1^0, а дубина пенетрације трна алата одржавана је на 5,5 mm, што је 0,5 mm мање од дебљине узорака. За заваривање је коришћено 15 модела алата са трном конусног профила израђених од челика Č.1531, Č.4830 и Č.5742, базираних на конструкцији алата A3 чијом применом су у првој фази експерименталног рада постигнути најбољи резултати.

Табела 3.8. Коришћени односи Vrot/Vzav и материјал алата по серијама заваривања.

серија	проба	V_{rot}/V_{zav}											материјал алата
1.	**1-14**	25,65	20,34	16,38	16,16	13,01	12,69	10,17	8,19				Č.1531
2.	**15-36**	51,30	40,69	25,65	20,34	12,93	12,69	10,27	10,17	8,06	6,46	5,00	Č.4830
3.	**37-48**	51,30	25,65	10,27	10,17	8,06	6,46	5,00					Č.5742
4.	**49-60**	25,65	10,27	10,21	10,17	8,19	8,06	7,87	6,46	6,33	5,00		Č.5742

*засенчени су односи коришћени за потврђивање поновљивости процеса.

Табела 3.9. Параметри заваривања легуре Al 2024 и однос Vrot/Vzav.

V_{rot} (obr/min)	V_{zav} (mm/min)												
	23	**29**	**37**	**46**	**58**	**73**	**93**	**116**	**150**	**190**	**235**	**300**	**380**
750					12,93	10,27	8,06	6,46	5,00				
950					16,38	13,01	10,21	8,19	6,33	5,00			
1180	51,30	40,69		25,65	20,34	16,16	12,69	10,17	7,87				

*засенчени су односи при којима су добијени коректни спојеви без грешака.

У првој серији заварено је 14 проба, применом 7 различитих модела алата израђених од челика Č.1531.

У другој серији заварене су 22 пробе, применом 8 различитих модела алата израђених од челика Č.4830.

У трећој серији заварено је 12 проба, применом 5 одабраних модела алата израђених од челика Č.5742 (Слика 3-5). Ради остваривања ***поновљивости процеса***, поред алата исте геометрије, коришћени су и исти параметри заваривања чијом применом су у претходној серији добијени задовољавајући резултати (Табела 3.8).

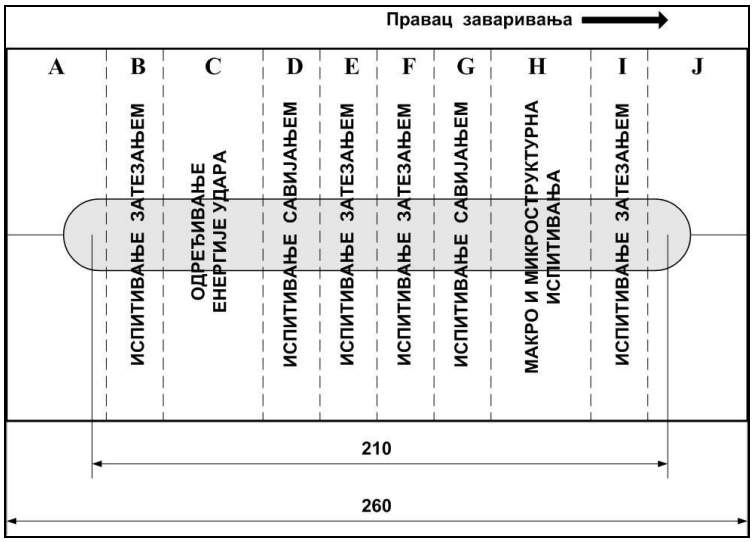
У четвртој серији заварено је 12 проба, применом алата 310. Поновљивост процеса обезбеђена је применом истог алата и истих параметара заваривања као у претходној серији (Табела 3.8). Поред тога, експериментисано је и са четири додатна параметра заваривања за које је претпостављено да омогућавају добијање квалитетног споја.

3.5. ИСПИТИВАЊА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

Испитивања заварених спојева састојала су се од недеструктивних (испитивања без разарања) и деструктивних метода (испитивања са разарањем). Испитивања без разарања обухватала су визуелни преглед, ултразвучну и радиографску контролу као и испитивања пенетрантима а од испитивања са разарањем спроведена су механичка, структурна и корозиона испитивања. Сва испитивања су спроведена у складу са важећим стандардима. Деструктивним методама испитивања подвргнути су само они спојеви код којих применом недеструктивних метода није уочено присуство грешака у споју. Карактеризација добијених заварених спојева спроведена је у 12 корака према методологији испитивања датој у Табели 3.10. На слици 3-8, приказана је шема означавања и распоред узорковања епрувета и шлифова из завареног споја за механичка и структурна испитивања.

Табела 3.10. Методологија испитивања заварених спојева

испитивања без разарања	корак 1	визуелни преглед
	корак 2	испитивање пенетрантима
	корак 3	радиографска контрола
	корак 4	ултразвучна контрола
испитивања са разарањем	корак 5	затезне карактеристике
	корак 6	савојне карактеристике
	корак 7	расподела тврдоће
	корак 8	одређивање енергије удара
	корак 9	развој макроструктуре
	корак 10	развој микроструктуре
	корак 11	SEM
	корак 12	корозиона испитивања



Слика 3-8. Шема узорковања и означавања епрувета и узорака за механичка и структурна испитивања.

3.5.1. Испитивања без разарања

3.5.1.1. Визуелни преглед

Заварени спојеви су након израде прво подвргнути визуелном прегледу у циљу откривања видљивих (површинских) грешака. Спојеви код којих је визуелним испитивањем уочено присуство површинских грешака дисквалификовани су од било каквог даљег испитивања. Испитивање је спроведено према стандарду SRPS EN-970 [143].

3.5.1.2. Испитивање пенетрантима

Спојеви код којих визуелним прегледом није уочено присуство површинских грешака подвргнути су испитивању пенетрантима. Испитивање пенетрантима је спроведено у циљу откривања присуства микропорозности на лицу споја и непровара на кореној страни споја а спроведено је према одредбама стандарда SRPS EN 571-1 [144]. За испитивања су коришћени пенетрирајућа течност и развијач произвођача MR Chemie, GmbH, Немачка.

3.5.1.3. Радиографска контрола

Спојеви код којих визуелним прегледом и испитивањем пенетрантима нису уочене присутне грешке, подвргнути су радиграфској контроли у циљу откривања

унутрашњих (запреминских) грешака. Радиографска испитивања су спроведена у Техникиму Барич при следећим условима: филм – Structurix D7Pb, напон струје – 80KV, јачина струје – 5 mA, време експозиције – 45 секунди, одстојање – 700 mm а према одредбама стандарда SRPS EN 1435 [145]. Спојеви код којих је радиографском контролом установљено присуство запреминских грешака нису детаљније испитивани. Из оваквих незадовољавајућих спојева, израђени се шлифови на којима је урађена макроструктурна анализа и расподела тврдоће кроз спој. На тај начин је на основу добијених резултата, разматран утицај параметара заваривања и геометрије алата на структуру споја, анализирала типична места појављивања грешака, њихова величина, облик и простирање као и карактер течења материјала током заваривања. На основу извучених запажања, вршене су корекције параметара заваривања и геометрије алата.

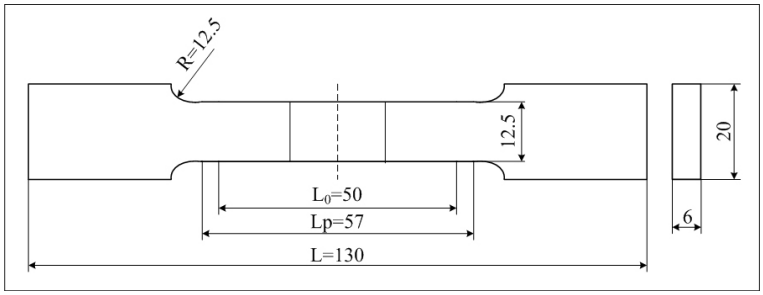
3.5.1.4. Ултразвучна контрола

Ултразвучна контрола рађена је на уређају Krautkramer USM 22, а спроведена је у циљу потврде и провере резултата радиографских испитивања.

3.5.2. Испитивања механичких карактеристика

3.5.2.1. Одређивање затезних карактеристика једноосним затезањем

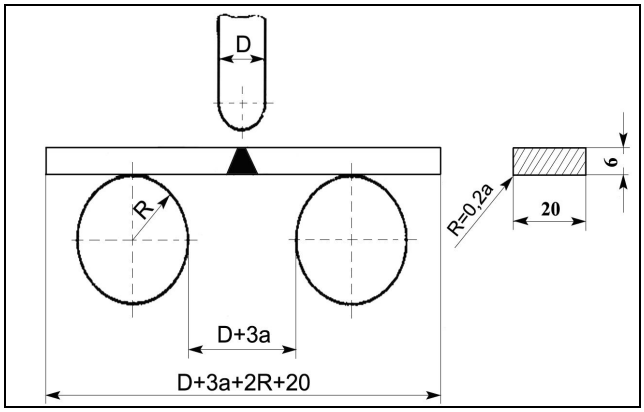
Затезне карактеристике завареног споја као целине и место прелома, одређиване су на епруветама са паралелним боковима израђеним према стандарду ASTM E-8M (Слика 3-9). Испитивање је спроведено према одредбама стандарда SRPS EN 10002-1 на хидрауличној кидалици Amsler SZBDA 599 опсега 200 kN и на инстументираној механичкој кидалици ZWICK опсега 50 kN. Епрувете су израђене попречно на заварени спој, према шеми на слици 3-8. Епрувете у свом радном делу имају обухваћен ОМ, ЗУТ, ЗТМУ и грумен, у дужини која је већа од 4 дебљине узорка. Овакав начин израде и испитивања епрувета омогућио је одређивање затезних карактеристика споја као целине и место прелома. Урађена је анализа преломних површина затезних епрувета. Из односа вредности затезне чврстоће и издужења завареног споја и основног материјала, ($Rm_{ЗС}/Rm_{ОМ}$) и ($A_{ЗС}/A_{ОМ}$) респективно, рачуната је ефикасност завареног споја.



Слика 3-9. Изглед и димензије епрувете за одређивање затезних карактеристика.

3.5.2.2. Одређивање савојних карактеристика савијањем у три тачке

Испитивање савојних карактеристика заварених спојева урађено је савијањем у три тачке, око лица и око корена споја, према одредбама стандарда SRPS C.T3.051 и SRPS C.T3.055 [146,147]. Ова испитивања су спроведена у циљу одређивања деформационих способности завареног споја. Бележена је величина угла при појави прве прслине као и сила при којој долази до појаве прве прслине. Након појаве прве прслине, савијање је настављено све до потпуног прелома епрувете или достизања угла од 180^0. Урађена је анализа преломних површина епрувета. Епрувете су израђене попречно на заварени спој према шеми на слици 3-8 а димензије коришћених епрувета приказане су сликом 3-10.

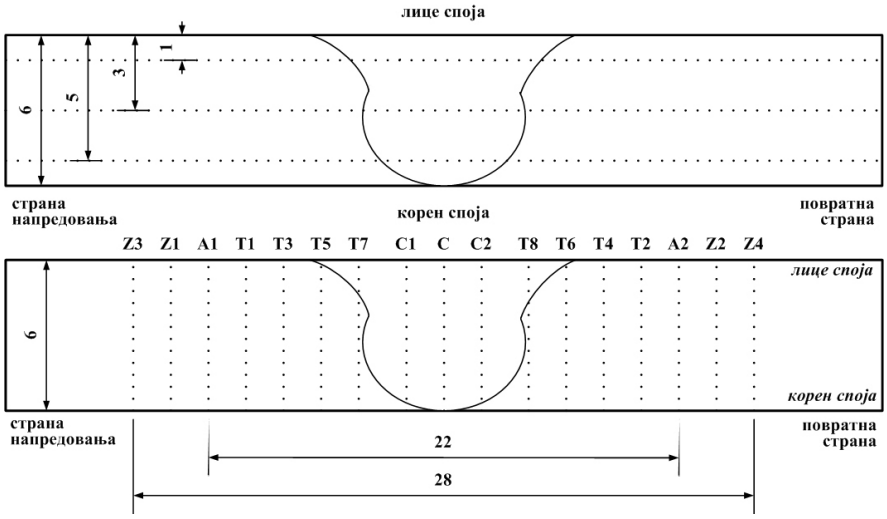


Слика 3-10. Изглед апаратуре и димензије епрувете за одређивање савојних карактеристика.

3.5.2.3. Одређивање тврдоће

Расподела тврдоће одређивана је према одредбама стандарда SRPS C.A4.040 и SRPS C.T3.051 на узорцима за макроструктурну анализу [148]. Коришћењем узорака на којима је развијена макроструктура омогућено је прецизно позиционирање и контролисање места мерења (ОМ, ЗУТ, ЗТМУ и грумен).

Тврдоћа је мерна методом Vickersa HV1 и HV3, на дигиталном уређају за мерење микротврдоће HVS-1000 и стандардном уређају за мерење тврдоће Wolpert, респективно. Растојање између отисака износило је 0,5 mm за HV1 односно 1,0 mm за HV3. Расподела тврдоће мерена је кроз попречан пресек завареног споја у хоризонталном и вертикалном правцу (Слика 3-11). Тврдоћа кроз спој у хоризонталном правцу мерена је у три зоне тако да у свакој зони буду обухваћени ОМ, ЗУТ, ЗТМУ и грумен. Прва зона мерења се налази на растојању од 1 mm, друга на 3 mm а трећа на 5 mm од лица споја. Тврдоћа у вертикалном правцу мерена је у 17 карактеристичних области споја. Оваквим начином мерења добијена је расподела тврдоће кроз цео попречан пресек завареног споја, као и увид у ниво тврдоће у сваком од карактеристичних делова завареног споја. Великим бројем извршених мерења по једном узорку (183 у уздужном и 187 у вертикалном правцу), омогућено је мапирање и графички приказ простирања карактеристичних области завареног споја.

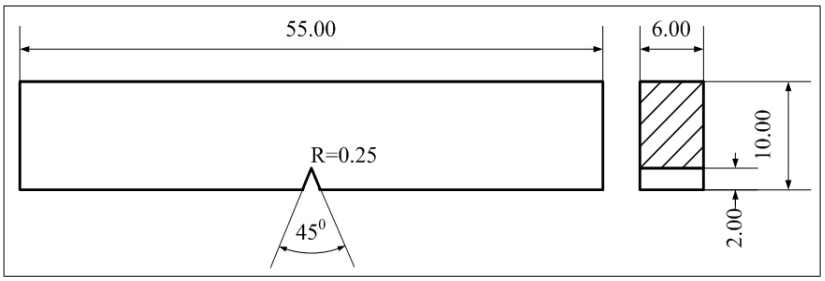


Слика 3-11. Шематски приказ места мерења тврдоће.

3.5.2.4. Одређивање енергије удара

Енергија удара одређивана је у складу са одредбама стандарда SRPS EN 10045-1 и SRPS C.T3.051 [149]. Испитивања су изведена на собној температури, на инструментираном Thinius Olsen Шарпи клатну називне енергије 300 J. Клатно поседује интегрисани систем за аквизицију података чиме је омогућено да се поред укупне енергије удара утрошене за прелом, одреде и енергија стварања и

ширења прслине. Епрувете су израђене попречно на заварени спој, према шеми на слици 3-8. Због дебљине завариваних плоча није било могуће израдити стандардну епрувету, па су за испитивања коришћене нестандардне епрувете димензија 55x10x6 mm са „V2“ зарезом (Слика 3-12). Концентратор напона (зарез) наношен је у области грумена. Урађена је анализа преломних површина епрувета. Ради могућности упоређивања нивоа жилавости, поред енергије удара заварених спојева одређивана је и енергија удара основног материјала. На тај начин, размотрено је како и у којој мери примењени режим заваривања, односно параметри заваривања, утичу на отпорност завареног споја изложеног ударним оптерећењима.



Слика 3-12. Изглед и димензије нестандардне епрувете за одређивање енергије удара.

3.5.3. Металографска испитивања

3.5.3.1. Макроструктурна испитивања

Развој макроструктуре и макроструктурна анализа попречног пресека завареног споја и његових делова (ОМ, ЗУТ, ЗТМУ, грумен) спроведени су на узорцима који садрже све карактеристчне делове споја. Узорци су из завареног споја извађени према шеми приказаној на слици 3-8. Анализа макроструктуре урађена је на стерео металографском микроскопу Leitz са интегрисаном камером Leica DFC 295, рачунарским системом и софтвером за аквизицију података и обраду слике. Испитивања су спроведена у циљу утврђивања постојања области грумена, ЗТМУ, ЗУТ-а и ОМ и анализе утицаја параметара заваривања на њихов положај, величину и облик. Такође, макроструктурна испитивања попречног пресека заварених спојева, посматрањем линија течења материјала, послужила су за

анализирање карактера и смера кретања материјала током заваривања при различитим параметрима заваривања.

Припрема узорака за испитивање се састојала од класичних поступака машинске обраде, механичког брушења и нагризања одговарајућим реагенсом. Након исецања из завареног споја, узорак је машински обрађен и поравнат. Брушење је изведено на брусним папирима финоће P150, P240, P320, P400, P600, P1200 и P2500. Развој макроструктуре споја легуре 2024 обезбеђен је потапањем и држањем узорка 10 sec у Tuckers-овом реагенсу (45ml HCl, 15ml HNO_3, 15ml HF, 25ml H_2O) односно Poulton-овом реагенсу (60ml HCl, 30ml HNO_3, 5ml HF, 5ml H_2O) за легуру 5052, испирањем водом и алкохолом и сушењем у струји топлог ваздуха.

3.5.3.2. Микроструктурна испитивања

За микроструктурну анализу попречног пресека завареног споја и његових делова (ОМ, ЗУТ, ЗТМУ, грумен) из завареног споја су према шеми на слици 3-8 исечени одговарајући узорци који садржи све карактеристчне делове споја. За микроструктурну анализу коришћен је светлосни металографски микроскоп Leitz-Metalloplan са интегрисаном камером Leica DFC 295, рачунарским системом и софтвером за аквизицију података и обраду слике. Испитивање микроструктуре завареног споја и његових делова урађено је у циљу сагледавања промене структуре грумена и ЗТМУ, услед њихове истовремене изложености повишеној температури и механичком оптерећењу. У том смислу, извршена је анализа промене структуре у зависности од примењених параметара заваривања, односно количини унете топлоте. На тај начин размотрен је утицај који параметри заваривања, преко количине унете топлоте, имају на очекивану рекристализацију зрна, која је према саопштеним подацима нарочито изражена у области грумена и рукавца а у нешто мањој мери у ЗТМУ. Узорци су нагрижени на границу зрна и одређивана је величине зрна у различитим деловима споја.

Припрема узорака за испитивање се састојала од класичних поступака машинске обраде, механичког брушења и полирања и нагризања одговарајућим реагенсом. Након исецања из завареног споја узорак је машински обрађен и поравнат. Брушење је изведено на брусним папирима финоће P150, P240, P320, P400, P600,

P1200 и P2500. За полирање узорка коришћене су дијамантске пасте гранулације 7/5 μm, односно 5/3 μm за завршно полирање. У циљу добијања квалитетније површине након полирања дијамантском пастом, примењена је и техника електрохемијског полирања и нагризања. Електрохемијско полирање и нагризање извршено је на уређају Polectorl - STRUERS. За електрохемијско полирање коришћен је водени раствор перхлорне киселина а за нагризање Barker's-ов реагенс (водени раствор бор-флуороводоничне киселине). Услови полирања: напон 20V, време 60 sec, брзина мешања 8. Услови нагризања: напон 12V, време 120 sec, брзина мешања 8.

3.5.3.3. Електронска микроскопија - SEM

Испитивања на скенирајућем електронском микроскопу JEOL JSM 6610LV, који поседује и могућност хемијске анализе путем EDS анализатора, спроведена су са циљем да се изврши анализа карактеристичних преломних површина затезних и жилавосних епрувета и одреди место иницијације прслине као и карактер и правац њеног простирања. Применом EDS анализатора, одређен је хемијски састав места иницијације прслине.

3.5.4. Корозионо понашање

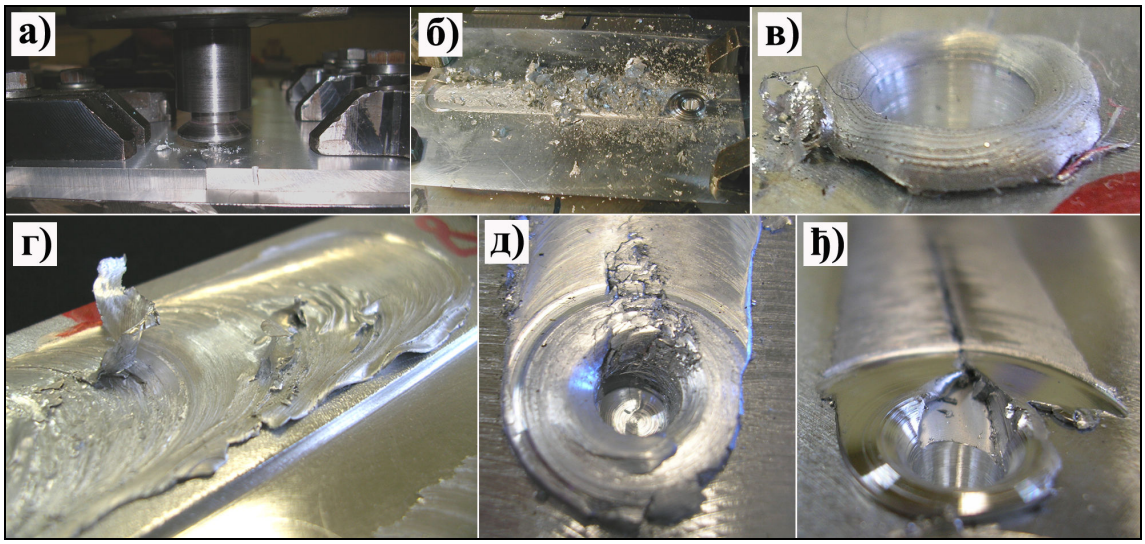
Корозиона испитивања имала су за циљ анализирање понашање спојева заварених FSW поступком у корозионој средини. Разматрано је како и у коликој мери примењени параметри заваривања утичу на корозиону отпорност завареног споја као и који делови споја су најосетљивији, односно најотпорнији на корозионе процесе. Поред тога, извршена је и упоредна анализа корозионе постојаности споја завареног FSW поступком и основног материјала. Испитивања су спроведена према одредбама стандарда ASTM G 34-01 [150].

4. РЕЗУЛТАТИ

4.1. ПРЕЛИМИНАРНИ РЕЗУЛТАТИ

Током прелиминарног програма, перманентно су праћене, бележене и анализиране уочене појаве везане за понашање завариваног материјала под дејством алата и то са аспекта (Слика 4-1):

- начина продирања трна у материјал узорка,
- присуства и изгледа шпона при продирању трна алата,
- истискивања омекшалог материјала под дејством трна алата,
- истискивања омекшалог материјала под дејством чела алата,
- изгледа лица завареног споја,
- изгледа и облика излазног отвора.

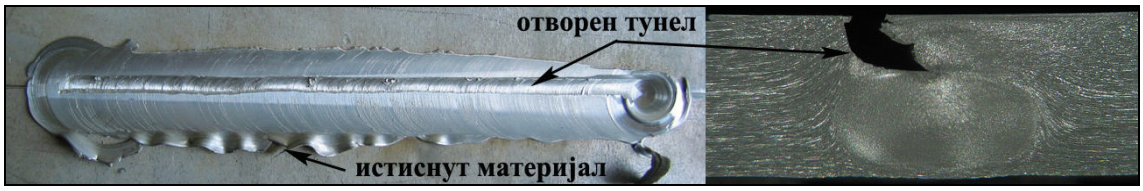


Слика 4-1. Понашање завариваног материјала под дејством алата.

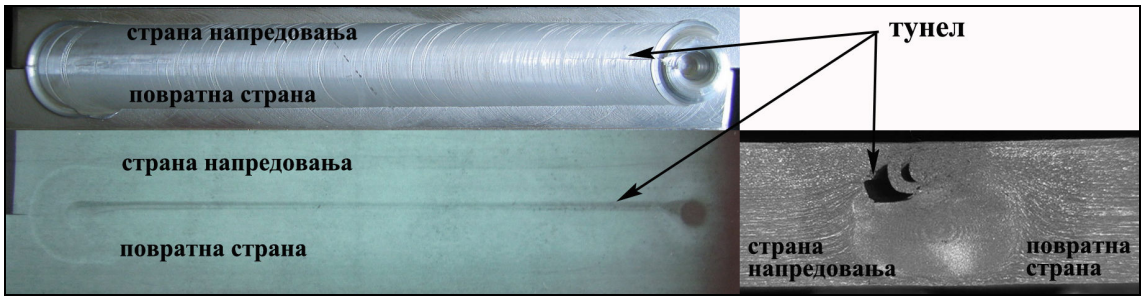
4.1.1. Заваривање легуре 5052-H32

Заварена је легура 5052 и резултати испитивања заварених спојева послужили су за овладавање технологијом заваривања, практично упознавање са процесом и карактеристикама поступка, дефинисање геометрије алата, избор параметара заваривања и анализу њиховог утицаја на карактеристике завареног споја. Сагледан је кумулативни утицај параметара заваривања (првенствено V_{rot} и V_{zav}) и

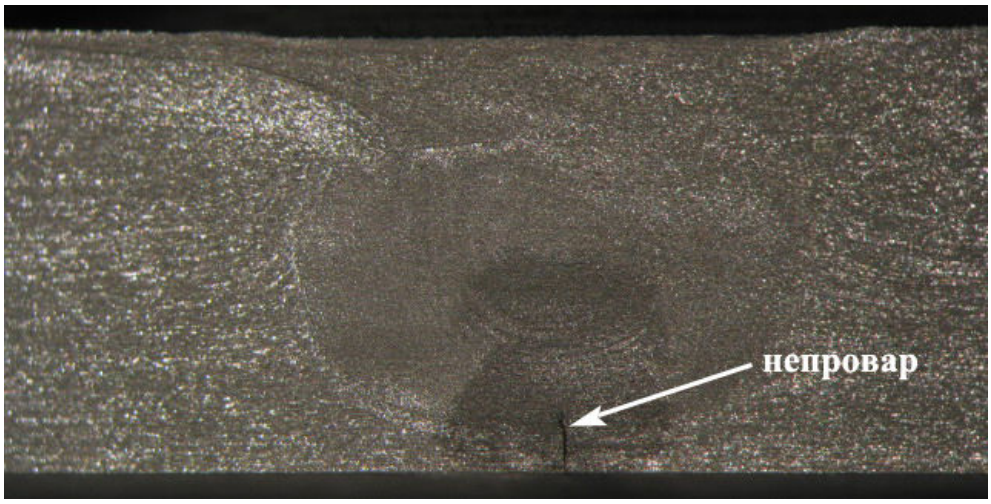
геометрије алата на могућност добијања споја задовољавајућег квалитета и његове карактеристике. Процес заваривања легуре 5052-H32, пратило је присуство структурних грешака и процесних проблема, као што су појава тунела или канала, присуство грешке типа непровара на кореној страни споја, појава шпона при пенетрацији алата, истискивање омекшаног материјала ван зоне заваривања, односно ван габарита алата, „лепљење“ завареног узорка за потпорну плочу, итд (Слике 4-2 до 4-5).



Слика 4-2. Тунел (канал) видљив голим оком и истискивање материјала ван габарита алата (*лево*); макроструктура попречног пресека споја (*десно*).



Слика 4-3. Тунел присутан целом дужином споја уочљив на радиографском снимку (*доле*); макроструктура попречног пресека споја (*десно*).



Слика 4-4. Грешка типа непровара на кореној страни споја.

Слика 4-5. Карактеристични процесни проблеми прве фазе заваривања: **а)** избацивање шпона при пенетрацији трна алата; **б)** истискивање омекшаног материјала; **в)** „лепљење“ завареног узорка за потпорну плочу.

Наведени проблеми су се јављали као последица неадекватне геометрије алата, неодговарајућих параметара заваривања (V_{rot}, V_{zav}, угао нагиба алата), недовољне или превелике притисне силе у z-правцу, неодговарајуће дубине пенетрације трна алата као и сувише дугог временског периода ротације алата у месту пенетрације у материјал узорка. Уочени проблеми, превазилажени су променом брзине ротације и заваривања, односно успостављањем њиховог најповољнијег односа као и подешавањем угла нагиба алата, контролом дубине пенетрације алата и корекцијом геометрије алата. На основу резултата радиографске и пенетрантске контроле, визуелних запажања, металографских макро и микроструктурних испитивања добијених спојева, анализиран је утицај свих релевантних процесних параметара на понашање материјала током заваривања и вршена њихова корекција као и модификација алата.

Установљено је да конструкција алата са трном цилиндричног облика није задовољавајућа јер је извођење заваривање веома отежано а добијени спојеви су лошег квалитета са изразитим и константним присуством грешака. Са друге стране, код спојева заварених алатом са конусним трном добијени су прихватљиви резултати. Анализом постигнутих резултата одлучено је да се у даљем експерименталном раду за заваривање користе модели алата засновани на конструкцији алата са конусним профилом трна (Слика 3-3а).

Оптимални резултати заваривања остварени су применом алата А3 (Слика 4-6) при углу нагиба алата од 1^0, а за брзине ротације алата од 600 и 750 obr/min и брзине заваривања од 73, 93 и 116 mm/min, при чему се однос V_{rot}/V_{zav} кретао од 6,45 до 8,22 (Табела 3.7). Применом наведених параметара и алата добијени су

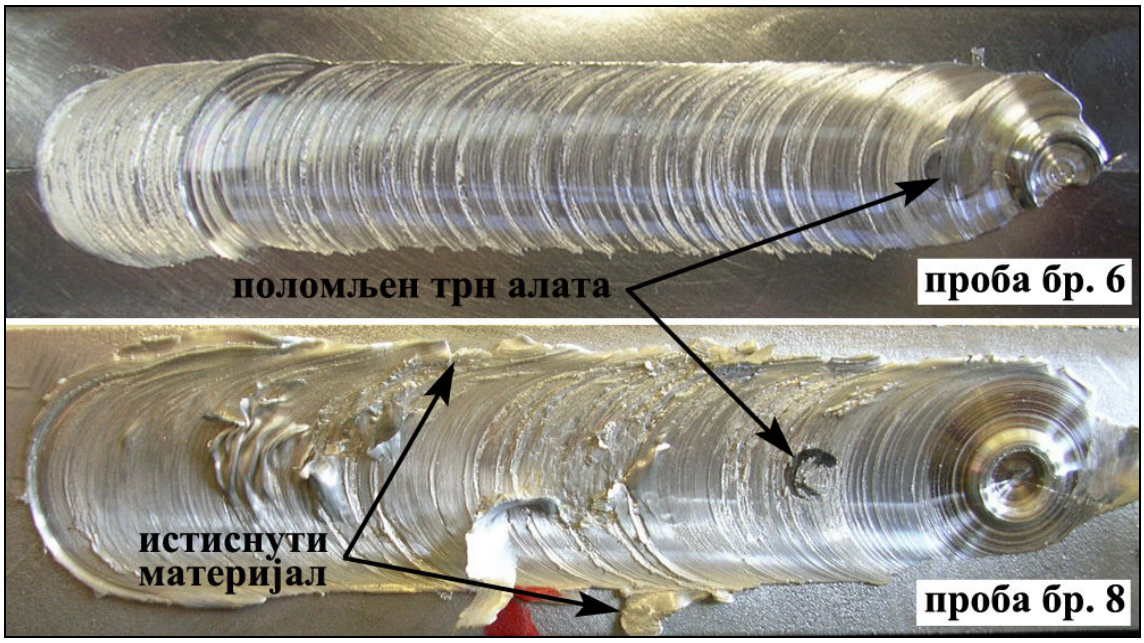
заварени спојеви добрих механичких карактеристика и коректног визуелног изгледа.

На овај начин је овладано је технологијом заваривања и стечена су неопходна искуства и сазнања за даљи експериментални рад на заваривању алуминијумске легуре 2024-T351.

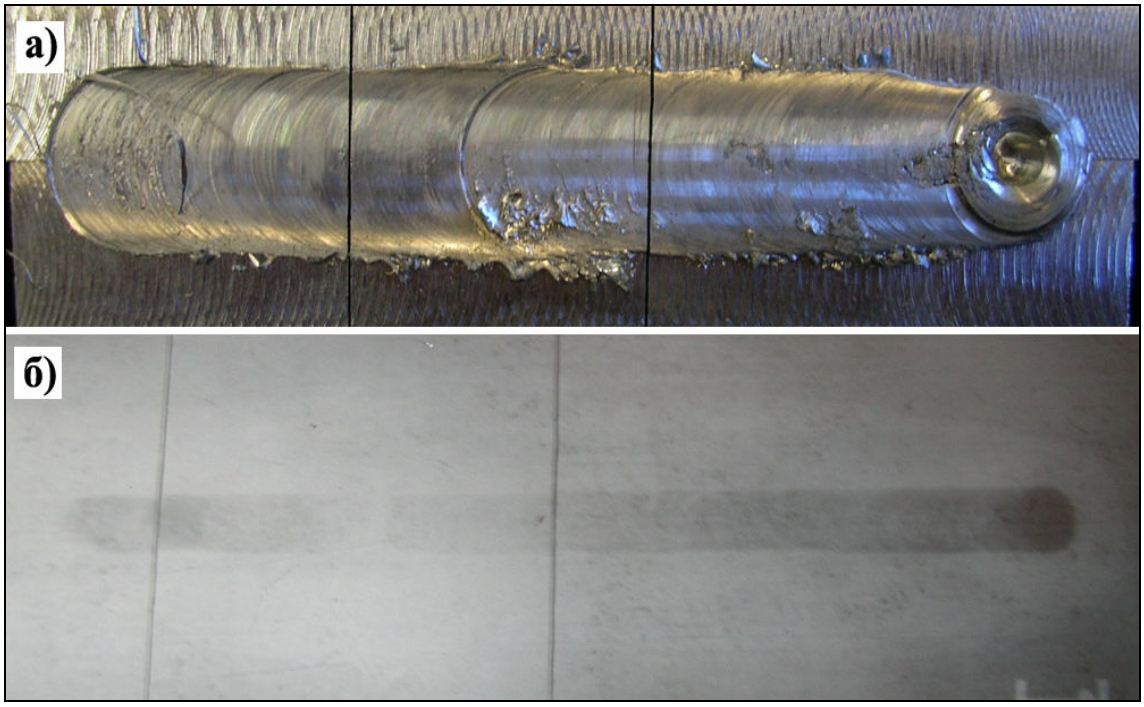
Слика 4-6. Изглед алата А3 са конусним трном и профилисаним челом ваљка.

4.1.2. Заваривање легуре 2024-T351

Заваривање у другој фази експерименталног рада изведено је у четири серије (Табела 3.8). У првој серији заварено је 14 проба, применом 7 различитих модела алата израђених од челика Č.1531. Током заваривања у првој серији долазило је до појаве лома трна алата, појаве тунела и истискивања материјала ван габарита алата током процеса заваривања (Слике 4-7 и 4-8). На основу анализе резултата радиографске и пенетрантске контроле, визуелних запажања, макроструктурних и механичких испитивања заварених спојева прве серије, одлучено је да се ураде нови алати са промењеним материјалом. На основу оних алата чијом применом су постигнути прихватљиви резултати, извршене су корекције геометријских карактеристика. Корекције су се углавном односиле на дефинисање и обликовање запремине „резервоара“ профилисаног чела ваљка, јер је установљено да алати са равном површином чела ваљка нису адекватни за заваривање плочастих узорака легуре 2024-T351 дебљине 6 mm.



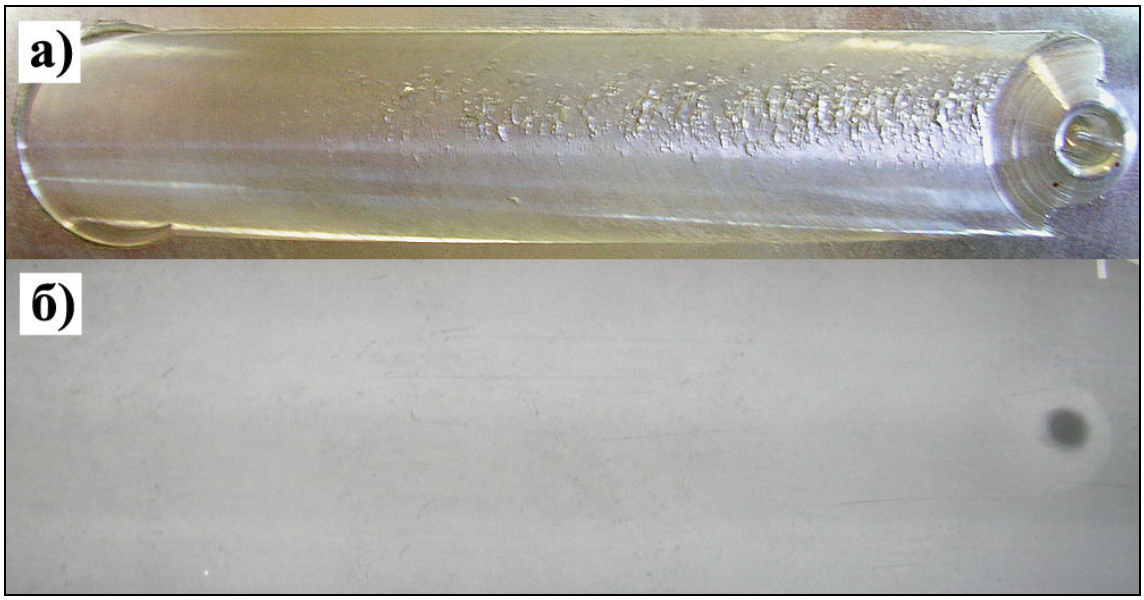
Слика 4-7. Карактеристични проблеми током прве серије заваривања: лом трна алата и истискивања материјала ван габарита алата – пробе бр. 6 и 8.



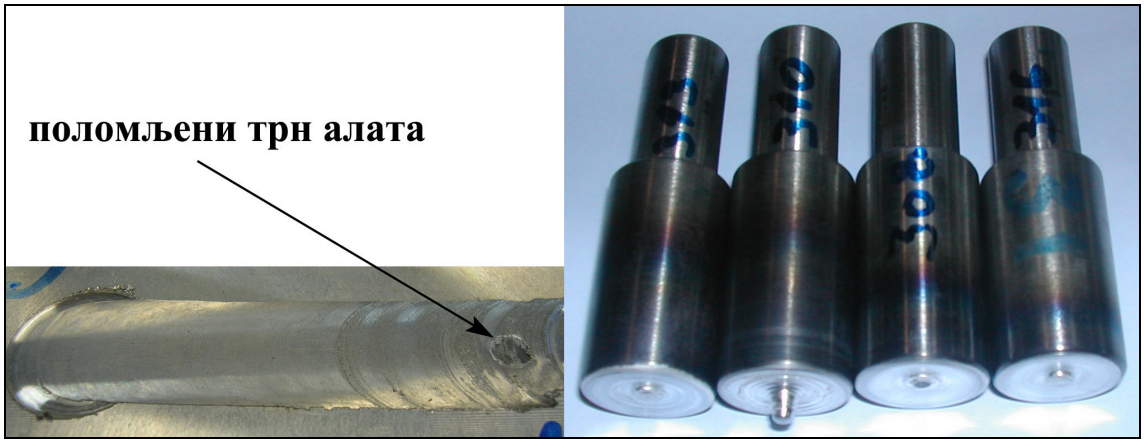
Слика 4-8. Карактеристичне грешке прве серије заваривања: тунел присутан целом дужином споја уочљив на радиографском снимку – проба бр.13.

У другој серији заварене су 22 пробе, применом 8 различитих модела алата израђених од челика Č.4830. Код већине заварених проба друге серије добијени су спојеви без присуства грешака (Слика 4-9). Са друге стране, због учесталог лома трна алата (Слика 4-10), закључено је да је геометрија алата задовољавајућа али

да мора да се промени материјал алата. Анализом визуелних запажања, резултата радиографске и пенетрантске контроле одабрано је 5 модела алата и њима одговарајући параметри заваривања чијом применом су добијени задовољавајући резултати. Оптимални резултати заваривања у другој фази рада остварени су применом алата 310 при углу нагиба алата од 10, за брзине ротације 750, 950 и 1180 obr/min и брзине заваривања 46, 73, 93, 116 и 150 mm/min, при чему се однос V_{rot}/V_{zav} кретао од 5,00 до 25,65 (Табела 3.9).

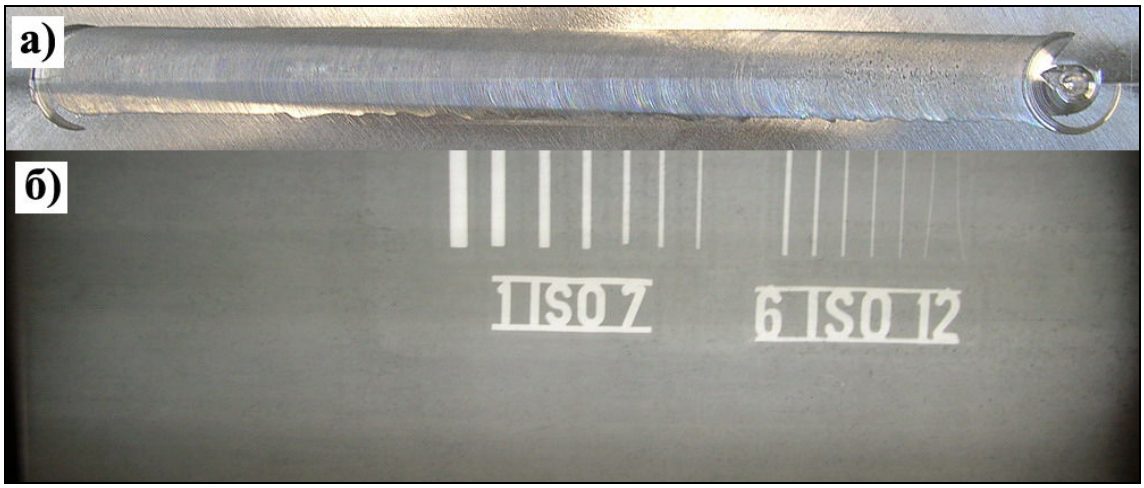


Слика 4-9. Пример добро завареног споја друге серије: изглед лица споја *(горе)*; радиографски снимак *(доле)*.



Слика 4-10. Карактеристични проблеми током друге серије заваривања: лом трна алата *(лево)* и изглед поломљених алата *(десно)*.

У трећој серији заварено је 12 проба, применом 5 одабраних модела алата израђених од челика Č.5742 (Слика 3-5). Код свих заварених проба треће серије заваривања, добијени су спојеви без присуства грешака (Слика 4-11). Анализом резултата радиографске и пенетрантске контроле, макроструктурних и механичких испитивања заварених спојева, установљено је да се спојеви најбољих карактеристика добијају применом алата 310 (Слика 3-5) те је он коришћен за даља заваривања.

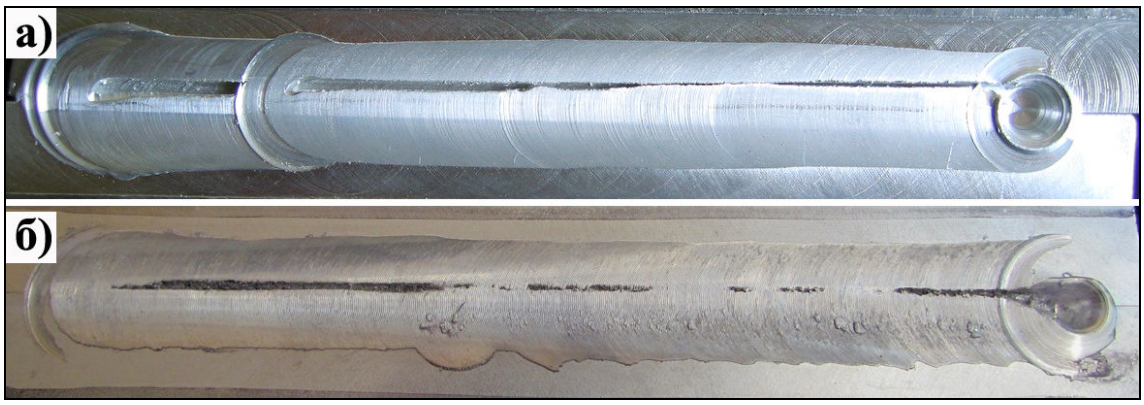


Слика 4-11. Пример добро завареног споја треће серије: изглед лица споја *(горе)*; радиографски снимак *(доле)*.

Применом овако широког распона параметара заваривања, при чему су добијени спојеви задовољавајућег квалитета, обезбеђен је различит ниво количине унете топлоте а тиме и сагледавање утицаја количине унете топлоте на карактеристике завареног споја и понашање материјала како у самом споју тако и у основном материјалу. На овај начин могуће је пратити и упоређивати промене до којих долази у материјалу током заваривања при различитим параметрима као и утицај параметара заваривања на квалитет и ефикасност споја.

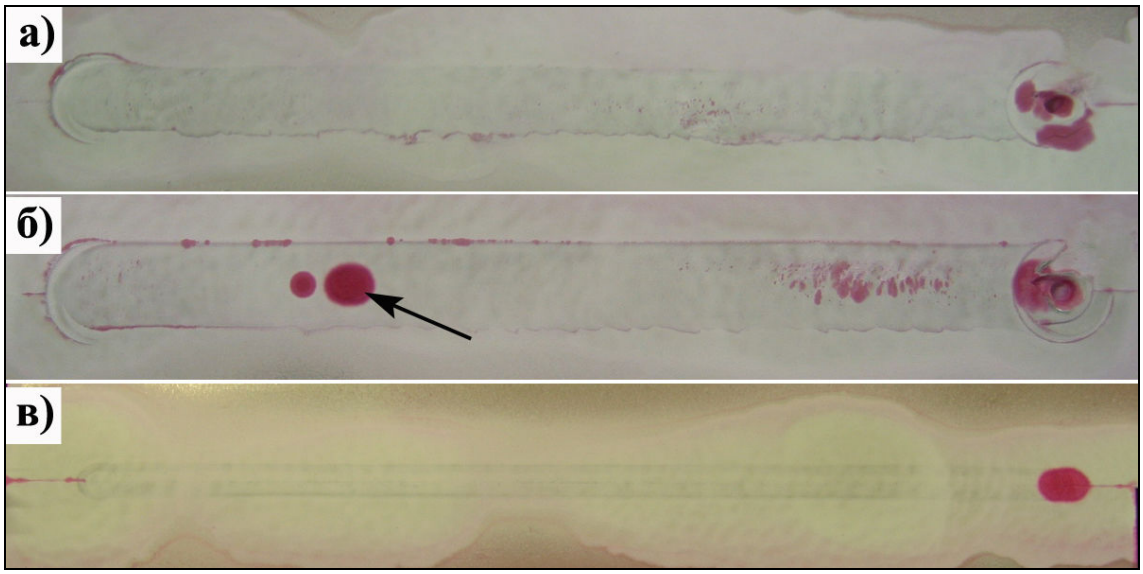
4.2. ВИЗУЕЛНА, ПЕНЕТРАНТСКА, РАДИОГРАФСКА И УЛТРАЗВУЧНА КОНТРОЛА

Заварени спојеви су након израде прво подвргнути визуелном прегледу у циљу откривања површинских (видљивих) грешака. Пробе заваривања, код којих је визуелним прегледом уочено присуство површинских грешака (Слика 4-12) елиминисане су из даљих испитивања. Присуство отвореног тунела (канала) на страни напредовања указује да је неки од параметара заваривања био изразито неповољан, односно да примењена комбинација услова и параметара заваривања није одговарајућа. Потврђена је ранија констатација да изглед (храпавост) лица споја веома зависи од примењених параметара заваривања.



Слика 4-12. Типичан изгледа лица споја елиминисаног од даљих испитивања услед израженог присуства површинске грешке: **а)** спој легуре 5052; **б)** спој легуре 2024

Испитивање пенетрантима спроведено је на свим узорцима код којих визуелним прегледом нису уочене површинске грешке. На слици 4-13 приказан је изглед узорака након примене развијача на пенетрантску течност. Ни у једном случају није откривено присуство непровара на кореној страни споја. Почетак и крај споја се не узимају у обзир јер исти нису ни заварени. На појединим узорцима уочено је присуство микропрслина на лицу споја (Слика 4-13б).



Слика 4-13. Пенетрантска контрола: **а)** лице споја без присуства грешака; **б)** лице споја са микропрскотином; **в)** корен споја без непровара.

Спојеви код којих визуелним и пенетрантским прегледом није уочено присуство површинских грешака, подвргнути су радиографском испитивању. Радиографским прегледом утврђивано је присуство запреминских грешака (тзв. „тунела“) у споју. Спојеви код којих је радиографским прегледом установљено присуство запреминских грешака нису детаљније испитивани. На оваквим спојевима урађена је само анализа макроструктуре и расподела тврдоће кроз попречни пресек споја. На основу извршених испитивања сагледаван је кумулативни утицај геометрије алата и параметара заваривања на могућност формирања завареног споја без присуства грешака и вршена њихова корекција.

Упоредни преглед радиографских снимака, изгледа лица споја и макроструктуре карактеристичних заварених проба легуре 5052 са навођењем коришћених алата, параметрима заваривања и одговарајућим односом V_{rot}/V_{zav}, дат је у Прилогу А.

Упоредан преглед радиографских снимака, изгледа лица споја карактеристичних заварених проба легуре 2024 са параметрима заваривања, коришћеним алатом, односом V_{rot}/V_{zav} и коментарима дат је у Прилогу Б.

4.3. ЗАТЕЗНА ИСПИТИВАЊА

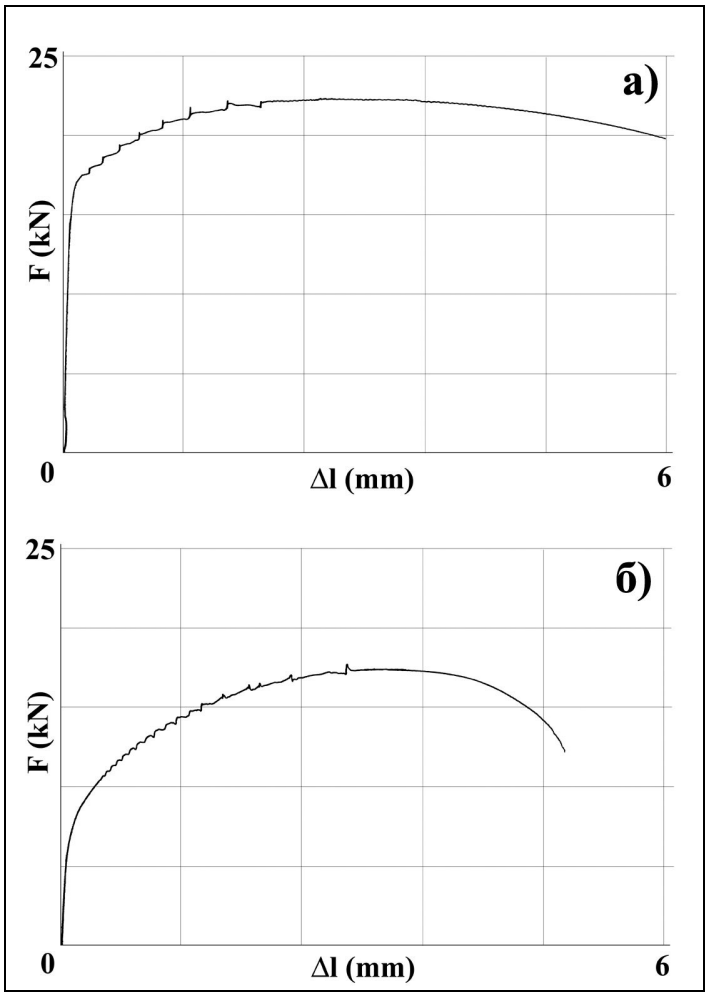
4.3.1. Затезне карактеристике спојева легуре 5052-H32

Резултати испитивања затезних карактеристика једноосним затезањем завареног споја легуре 5052-H32, ефикасност споја и место прелома дати су у Табели 4.1. Типичан изглед дијаграма (сила–издужење) за легуру 5052-H32 и њеног завареног споја приказан је на слици 4-14. Ради боље прегледности и могућности упоређивања, у Табели 4.1 дата је и средња вредност затезних карактеристика основног материјала.

Табела 4.1. Затезне карактеристике, ефикасност споја и место прелома заварених спојева легуре 5052.

параметри заваривања (V_{rot}/V_{zav})	*$Rp_{0,2}$ (Mpa)	Rm (Mpa)	A_5 (%)	ефикасност споја (%) ($Rm_{ЗС}/Rm_{ОМ}$)	ефикасност споја (%) ($A_{ЗС}/A_{ОМ}$)	место прелома
750/116=6,46	90	167	7,2	72	33	ЗТМУ – страна напредовања
	81	180	12,5	77	57	ЗТМУ – страна напредовања
	86	173	9,9	75	45	ЗТМУ – страна напредовања
	87	170	9,3	73	43	ЗТМУ – страна напредовања
ср. вредност	**86**	**173**	**9,7**	**74**	**45**	**присутна скривена грешка**
750/93=8,06	72	183	7,0	79	32	ЗТМУ – страна напредовања
	87	182	7,8	78	36	ЗТМУ – страна напредовања
	88	145	8,0	62	37	ЗТМУ – страна напредовања
	143	156	4,0	67	18	ЗТМУ – страна напредовања
ср. вредност	**98**	**167**	**6,7**	**72**	**31**	**присутна скривена грешка**
600/93=6,45	/	181	13,2	78	60	ЗТМУ – страна напредовања
	85	152	9,0	66	41	ЗТМУ – страна напредовања
	/	149	2,5	64	11	ЗТМУ – страна напредовања
	132	175	2,7	75	12	ЗТМУ – страна напредовања
ср. вредност	**109**	**164**	**6,9**	**71**	**31**	**присутна скривена грешка**
600/73=8,22	72	183	9,8	79	45	ЗТМУ – страна напредовања
	76	186	11,5	80	53	ЗТМУ – страна напредовања
	95	179	7,1	77	32	ЗТМУ – страна напредовања
	100	181	7,4	78	34	ЗТМУ – страна напредовања
ср. вредност	**86**	**182**	**8,9**	**79**	**41**	**присутна скривена грешка**
600/73=8,22	133	221	9,1	95	42	ЗТМУ – страна напредовања
	124	229	10,1	98	46	ЗТМУ – страна напредовања
	127	224	9,4	97	43	ЗТМУ – страна напредовања
ср. вредност	**128**	**225**	**9,5**	**97**	**44**	**елимисана скривена грешка**
ОМ	**175**	**232**	**21,8**			

* граница течења $Rp_{0,2}$ је резултат технолошке пробе и не сматра се физичком карактеристиком завареног споја

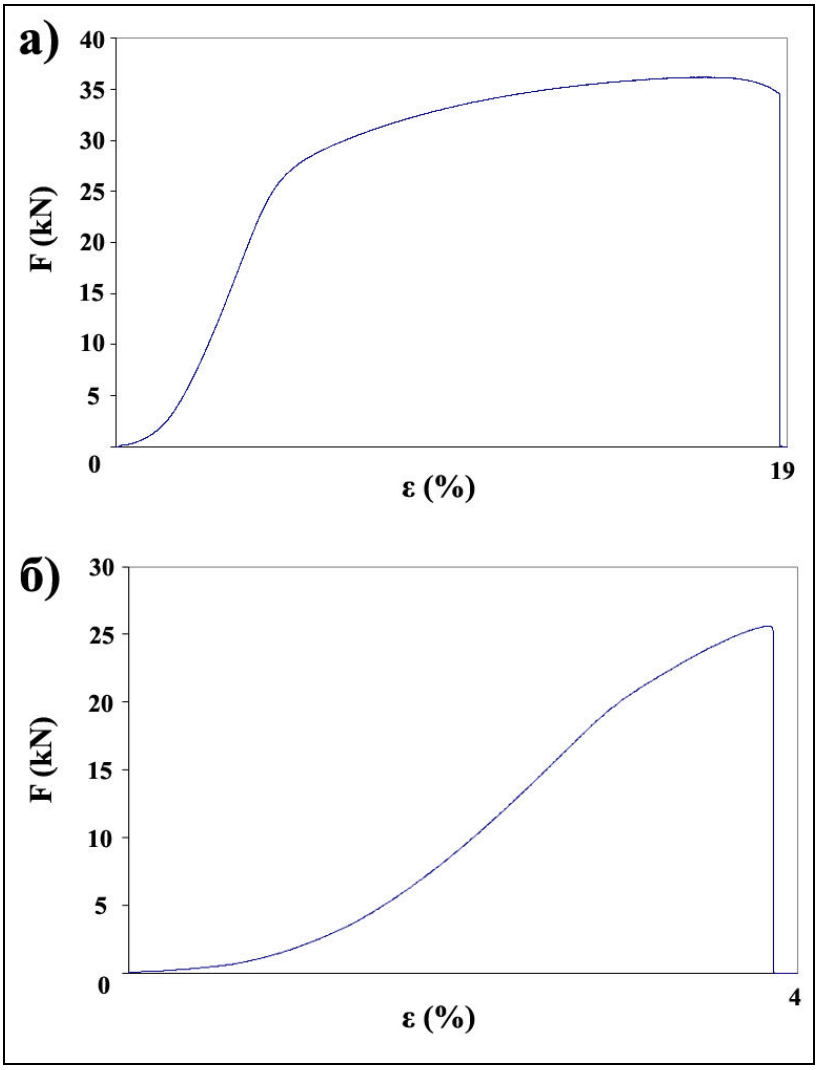


Слика 4-14. Дијаграм сила–издужење: **а)** основни материјал тј. легура 5052-H32; **б)** заварен спој легуре 5052-H32 (V_{rot}/V_{zav} = 600/73 = 8,22).

До прекида епрувета долази након достизања максималне силе (Слика 4-14) а место прелома је увек лоцирано на страни напредовања у ЗТМУ. Испитивања затезањем указала су на постојање „скривене“ грешке типа непровара на кореној страни завара, настале услед недовољне пенетрације трна алата, односно неадекватног (превеликог) растојања између врха трна алата и доње површине завариване плоче. Кориговањем растојања, елиминасано је присуство овог типа грешке, при чему је са истим параметрима заваривања (V_{rot}/V_{zav}=600/73=8,22) ефикасност споја повећана са 79% на 97% (Табела 4.1).

4.3.2. Затезне карактеристике спојева легуре 2024-T351

Типичан изглед дијаграма сила–издужење за легуру 2024-T351 и њеног завареног споја приказан је на слици 4-16. Резултати испитивања затезних карактеристика једноосним затезањем завареног споја легуре 2024-T351, ефикасност споја и место прелома дати су Табелама 4.2 и 4.3. У Табели 4.2 приказани су резултати затезних испитивања за спојеве заварене алатом 310 а у Табели 4.3 за спојеве заварене алатом 310-O а дата је и средња вредност затезних карактеристика основног материјала.



Слика 4-16. Дијаграм сила–издужење: **а)** основни материјал тј. легура 2024-T351; **б)** заварен спој легуре 2024-T351 (V_{rot}/V_{zav} = 950/116 = 8,19).

Табела 4.2. Затезне карактеристике, ефикасност споја и место прелома спојева легуре 2024 заварених алатом 310.

параметри заваривања (V_{rot}/V_{zav})	$Rp_{0,2}$ (MPa)	Rm (Mpa)	A_5 (%)	ефикасност споја (%) ($Rm_{ЗС}/Rm_{ОМ}$)	ефикасност споја (%) ($A_{ЗС}/A_{ОМ}$)	место прелома
1180/150=7,87		278	2,8	58	15	граница грумен-ЗТМУ (СН)
1180/116=10,17	327	391	5,6	81	30	граница грумен-ЗТМУ (ПС)
	307	403	6,9	83	37	грумен (ПС)
	334	399	5,4	82	29	граница грумен-ЗТМУ (ПС)
ср. вредност	**323**	**398**	**6,0**	**82**	**32**	
1180/46=25,65	310	391	7,6	81	40	граница ЗТМУ-ЗУТ (ПС)
	320	392	8,0	81	43	грумен (ЦЗ)
	317	390	5,8	81	31	граница ЗТМУ-ЗУТ (ПС)
ср. вредност	**316**	**391**	**7,1**	**81**	**38**	
950/116=8,19		325	3,3	67	18	граница грумен-ЗТМУ (СН)
		342	3,3	71	18	граница грумен-ЗТМУ (СН)
		340	3,8	70	20	граница грумен-ЗТМУ (СН)
ср. вредност		**336**	**3,5**	**70**	**19**	
950/93=10,21		346	3,2	72	17	граница грумен-ЗТМУ (СН)
		268	3,0	55	16	граница грумен-ЗТМУ (СН)
		337	2,8	70	15	граница грумен-ЗТМУ (СН)
ср. вредност		**317**	**3,0**	**66**	**16**	
750/150=5,00	324	382	5,0	79	27	граница грумен-ЗТМУ (ПС)
	/	200	2,8	41	15	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	324	409	6,5	85	35	граница грумен-ЗТМУ (СН)
		206	2,3	43	12	граница грумен-ЗТМУ (СН)
ср. вредност	**324**	**299**	**4,2**	**62**	**22**	
750/116=6,46	/	263	2,0	55	11	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	/	209	2,8	43	15	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	/	164	1,5	34	8	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	/	221	2,4	46	13	граница грумен-ЗТМУ (СН)
		327	3,6	68	19	грумен (ЦЗ)
		328	3,2	68	17	грумен (ЦЗ)
ср. вредност	**/**	**252**	**2,6**	**52**	**14**	
750/93=8,06	327	383	5,0	79	27	грумен (СН)
	314	387	6,0	80	32	грумен (СН)
	317	330	1,8	68	10	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	/	337	3,2	70	17	граница грумен-ЗТМУ (СН)
		336	3,6	70	19	грумен (ЦЗ)
ср. вредност	**319**	**355**	**3,9**	**74**	**21**	
750/73=10,27	320	403	8,0	83	43	граница ЗТМУ-ЗУТ (ПС)
	294	379	6,6	79	35	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	340	403	7,9	83	42	граница грумен-ЗТМУ (ПС)
ср. вредност	**318**	**395**	**7,5**	**82**	**40**	
ОМ	**370**	**483**	**18,8**	///	///	///

* **СН** – страна напредовања; **ПС** – повратна страна; **ЦЗ** – централна зона

* граница течења $Rp_{0,2}$ је резултат технолошке пробе и не сматра се физичком карактеристиком завареног споја

Табела 4.3. Затезне карактеристике, ефикасност споја и место прелома спојева легуре 2024 заварених алатом 310-О.

параметри заваривања (V_{rot}/V_{zav})	$Rp_{0,2}$ (MPa)	Rm (Mpa)	A_5 (%)	ефикасност споја (%) ($Rm_{ЗС}/Rm_{ОМ}$)	ефикасност споја (%) ($A_{ЗС}/A_{ОМ}$)	место прелома
750/150=5,00	/	220	2,0	46	11	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	/	276	2,6	57	14	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	/	135	2,1	28	11	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	/	187	1,6	39	9	граница грумен-ЗТМУ (СН)
ср. вредност	**/**	**205**	**2,1**	**43**	**11**	
750/116=6,46	/	279	1,6	58	9	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	/	133	2,2	27	12	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	/	167	2,2	35	12	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	/	233	0,6	48	3	граница грумен-ЗТМУ (СН)
ср. вредност	**/**	**203**	**1,7**	**42**	**9**	
750/93=8,06	/	353	3,4	73	18	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	/	294	2,8	61	15	граница грумен-ЗТМУ (СН)
	/	279	2,2	58	12	граница грумен-ЗТМУ (СН)
ср. вредност	**/**	**309**	**2,8**	**64**	**15**	
750/73=10,27	304	366	3,4	76	18	грумен (ЦЗ)
	317	366	5,2	76	28	грумен (ЦЗ)
	319	364	4,0	75	21	грумен (ЦЗ)
ср. вредност	**313**	**365**	**7,5**	**76**	**22**	
ОМ	**370**	**483**	**18,8**	///	///	///

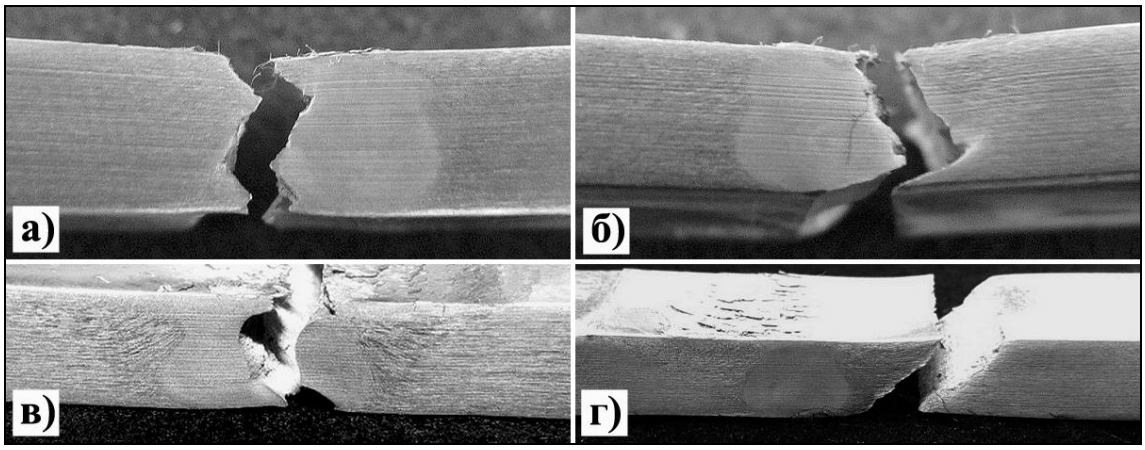
* **СН** – страна напредовања; **ПС** – повратна страна; **ЦЗ** – централна зона

До прекида затезних епрувета завареног споја долази непосредно по достизању максималне силе (Слика 4-16б) а место прелома није могуће једнозначно повезати са параметарима заваривања. Уочава се да је најкритичне место за прелом епрувете граница грумен – ЗТМУ на страни напредовања, јер се преко 2/3 епрувета ту преломило (Табела 4.4). Типична места прелома затезних епрувета завареног споја легуре 2024-Т351 приказана су на слици 4-17.

Табела 4.4. Број прелома затезних епрувета.

место прелома	број прелома	број прелома по алатима		број прелома у проценатима (%)		
		алат 310	алат 310-О	укупно	алат 310	алат 310-О
грумен (ЦЗ)	7	4	3	16	13	21
грумен (СН)	2	2	0	4	6	0
грумен (ПС)	1	1	0	2	3	0
укупно	**10**	**7**	**3**	**22**	**22**	**21**
граница грумен-ЗТМУ (СН)	28	17	11	62	55	79
граница грумен –ЗТМУ (ПС)	4	4	0	9	13	0
укупно	**32**	**21**	**11**	**71**	**68**	**79**
граница ЗТМУ-ЗУТ (СН)	0	0	0	0	0	0
граница ЗТМУ-ЗУТ (ПС)	3	3	0	7	10	0
укупно	**3**	**3**	**0**	**7**	**10**	**0**
укупан број прелома	**45**	**31**	**14**			

* **СН** – страна напредовања; **ПС** – повратна страна; **ЦЗ** – централна зона



Слика 4-17. Места прелома затезних епрувета завареног споја легуре 2024-Т351: **а)** граница грумен – ЗТМУ на страни напредовања; **б)** граница грумен – ЗТМУ на повратној страни; **в)** грумен – централна зона; **г)** граница ЗТМУ – ЗУТ на повратној страни.

4.4. ИСПИТИВАЊА САВИЈАЊЕМ

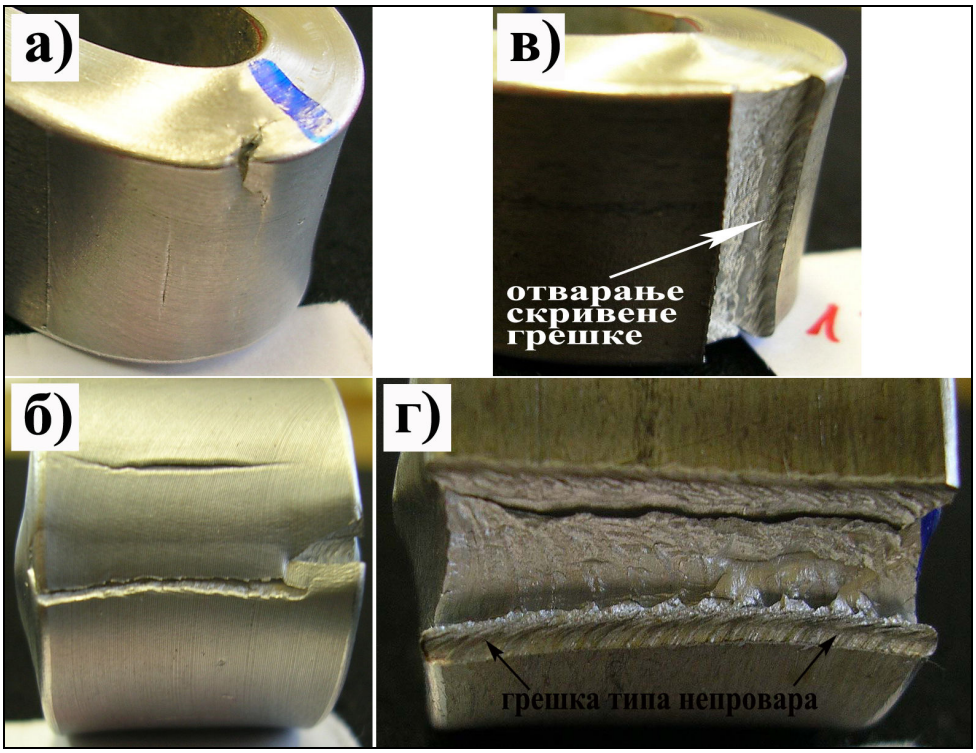
4.4.1. Савојне карактеристике спојева легуре 5052-Н32

Резултати одређивања угла савијања око лица и корена шава и места прелома епрувета спојева легуре 5052-Н32 дати су у Табели 4.5. Савијање епрувета је, након појаве прве прслине и одређивања величине достигнутог угла, настављено до угла од 180^0 при чему ни у једном случају није дошло до прелома епрувете.

Табела 4.5 Угао савијања заварених спојева легуре 5052.

параметри заваривања (V_{rot}/V_{zav})	**савијање**	**оптерећена страна завара**	**сила при појави прслине (kN)**	**угао при појави прслине (^{0})**
750/93=8,06	око корена	лице споја	3,43	76
	око лица	корен споја	3,92	112
600/73=8,22	око корена	лице споја	4,90	83
	око лица	корен споја	4,41	113

Испитивања савијањем такође су указала на постојање „скривене“ грешке типа непровара на кореној страни завара. Присуство овог типа грешке уочено је при савијању око лица. У овом случају оптерећена је корена страна завара, те долази до јасно израженог „отварања“ споја дуж присутне грешке типа непровара. На слици 4-18 приказан је типичан изглед и локација прслине при савијању око лица и корена.



Слика 4-18. Испитивање савијањем завареног споја легуре 5052: **а)** савијање око корена – изглед иницијалне прслине; **б)** савијање око корена – изглед прслине након савијања до 180^0; **в)** савијање око лица - изглед иницијалне прслине; **г)** савијање око корена - изглед прслине након савијања до 180^0.

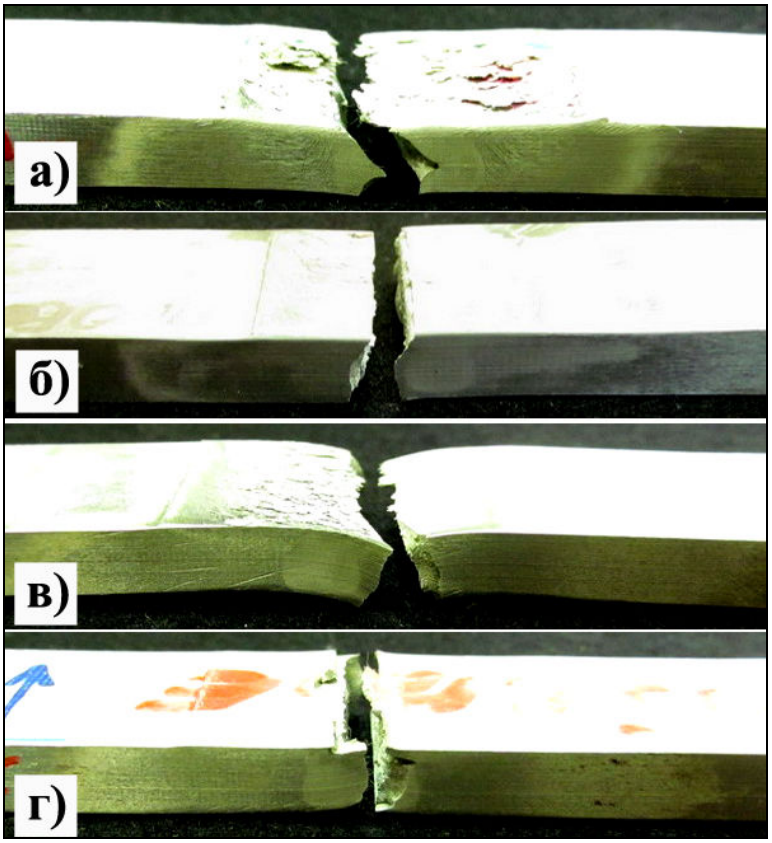
4.4.2. Савојне карактеристике спојева легуре 2024-T351

Резултати одређивања угла савијања око лица и корена шава и места прелома епрувета спојева легуре 2024-T351 дати су у Табели 4.6. Савијање епрувета је, након појаве прве прслине и одређивања величине достигнутог угла, настављено до прелома епрувете. У свим случајевима је дошло до прелома епрувете и то при сили незнатно већој од силе регистроване у тренутку појаве прскотине. На слици 4-19 приказан је типичан изглед и локација прслине при савијању око лица и корена.

Резултати одређивања угла савијања заварених спојева легуре 2024-T351 могу се сматрати задовољавајућим ако се има у виду да се ради о легури која је тешко заварљива класичним поступцима заваривања са топљењем материјала.

Табела 4.6. Угао савијања и места прелома спојева легуре 2024.

параметри заваривања (V_{rot}/V_{zav})	савијање	оптерећена страна завара	сила при појави прслине (kN)	угао при појави прслине (^{0})	место прелома епрувете
1180/116=10,17	око корена	лице споја	3,87	37	грумен - централна зона
	око лица	корен споја	4,22	25	грумен - централна зона
1180/46=25,65	око корена	лице споја	4,02	15	грумен - страна напредовања
	око лица	корен споја	5,98	43	грумен - централна зона
950/93=10,21	око корена	лице споја	3,63	15	ЗТМУ - страна напредовања
	око лица	корен споја	3,53	22	грумен - повратна страна
750/150=5,00	око корена	лице споја	5,34	35	ЗТМУ - повратна страна + грумен - централна зона
	око лица	корен споја	5,39	30	грумен - централна зона
750/116=6,46	око корена	лице споја	4,02	10	ЗТМУ - страна напредовања
	око лица	корен споја	4,36	27	грумен - централна зона
750/93=8,06	око корена	лице споја	6,28	47	ЗТМУ - повратна страна
	око лица	корен споја	3,72	21	грумен - повратна страна
750/73=10,27	око корена	лице споја	5,98	43	ЗТМУ - повратна страна
	око лица	корен споја	5,34	36	грумен - централна зона

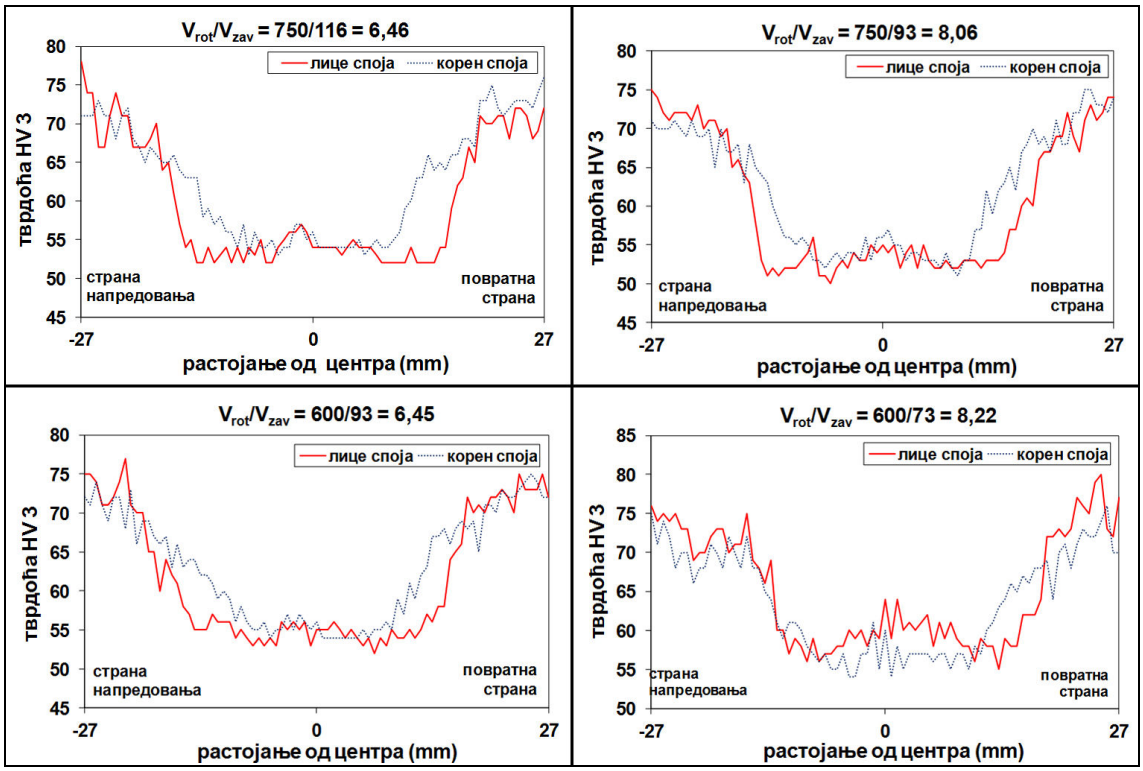


Слика 4.19. Места прелома при савијању спојева легуре 2024: **а)** прелом у грумену на СН при савијању око корена; **б)** прелом у ЗТМУ на страни напредовања при савијању око корена; **в)** прелом у ЗТМУ на повратној страни при савијању око корена; **г)** прелом у централној зони грумена при савијању око лица.

4.5. ТВРДОЋА

4.5.1. Расподела тврдоће кроз спој легуре 5052-H32

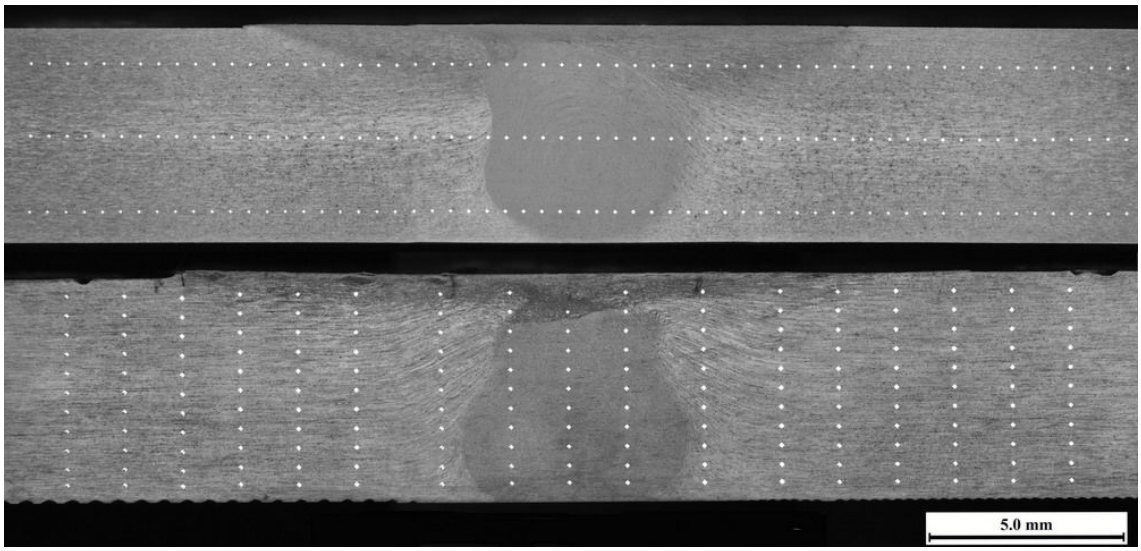
Резултати испитивања тврдоће кроз попречни пресек испитиваних заварених спојева легуре 5052-H32 класификовани су према параметрима заваривања и приказани на слици 4-20. Расподела тврдоће кроз пресек споја генерално је симетрична у односу на центар споја а одговарајући дијаграми имају исти облик без обзира на примењене параметре заваривања. У целом завареном споју дошло је до пада нивоа тврдоће у односу на основни материјал. Највећи пад тврдоће забележен је у ЗТМУ. У области грумена, у зависности од примењених параметара заваривања, ниво тврдоће је у малом порасту у односу на ЗТМУ што је нарочито изражено за чеону страну споја. Са друге стране, тврдоћа у ЗТМУ на кореној страни је виша од тврдоће на чеоној страни споја. Вредности тврдоће су у сагласности са резултатима затезних карактеристика, односно местом прелома епрувета.



Слика 4-20. Расподела тврдоће кроз попречан пресек споја легуре 5052.

4.5.2. Расподела тврдоће кроз спој легуре 2024-T351

Места мерења тврдоће кроз попречан пресека завареног споја у хоризонталном и вертикалном правцу приказана су сликом 4-21.



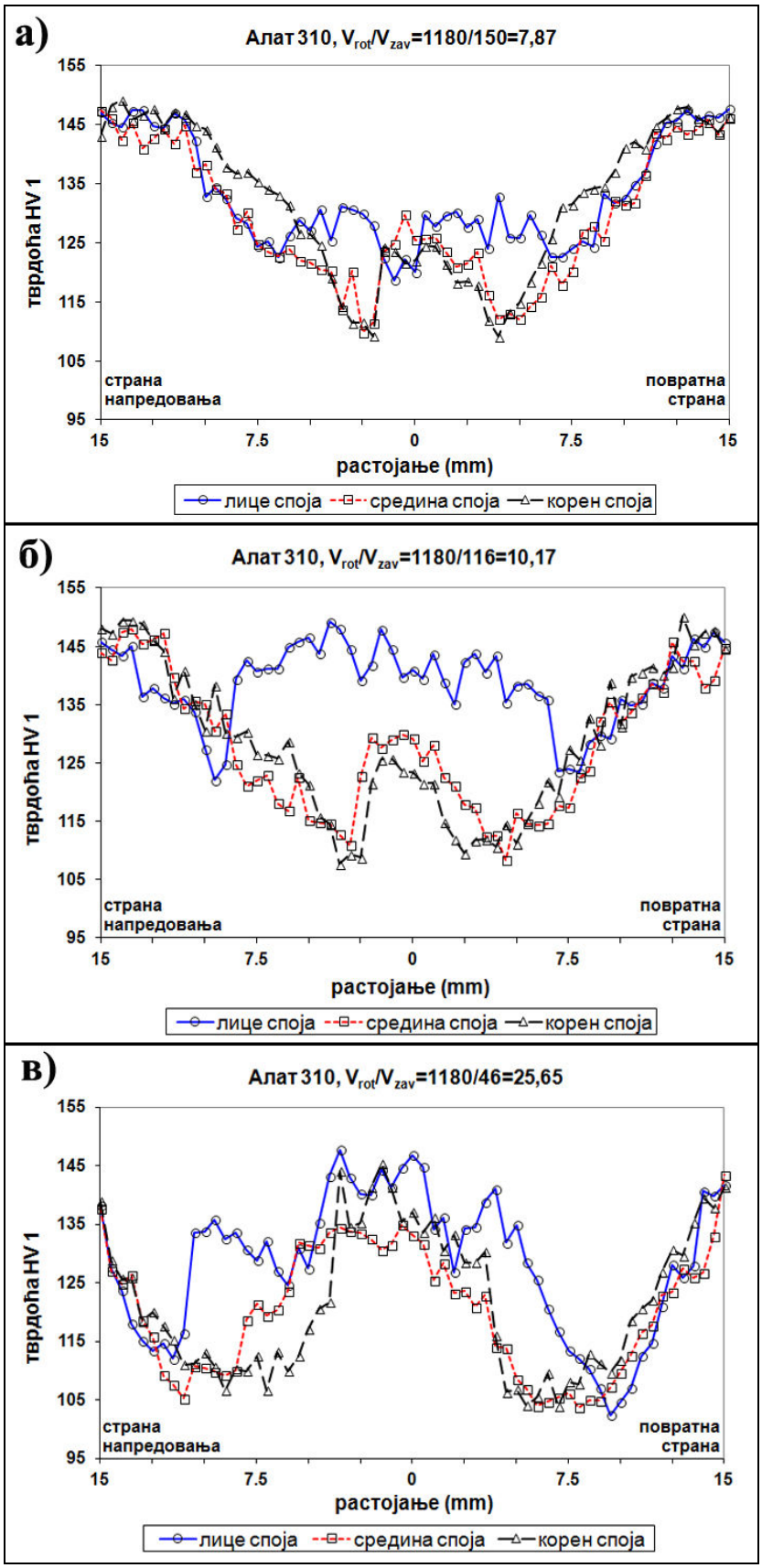
Слика 4-21. Места мерења тврдоће у хоризонталном (горе) и вертикалном правцу (доле).

Резултати испитивања тврдоће заварених спојева легуре 2024-T351 дати су у односу на коришћени алат и брзину ротације алата. Расподела тврдоће, у хоризонталом правцу, кроз попречан пресек споја приказана је на сликама 4-22 до 4-25. Мапирање области споја, извршено на основу расподеле тврдоће у вертикалном правцу, приказано је сликама 4-26 до 4-29.

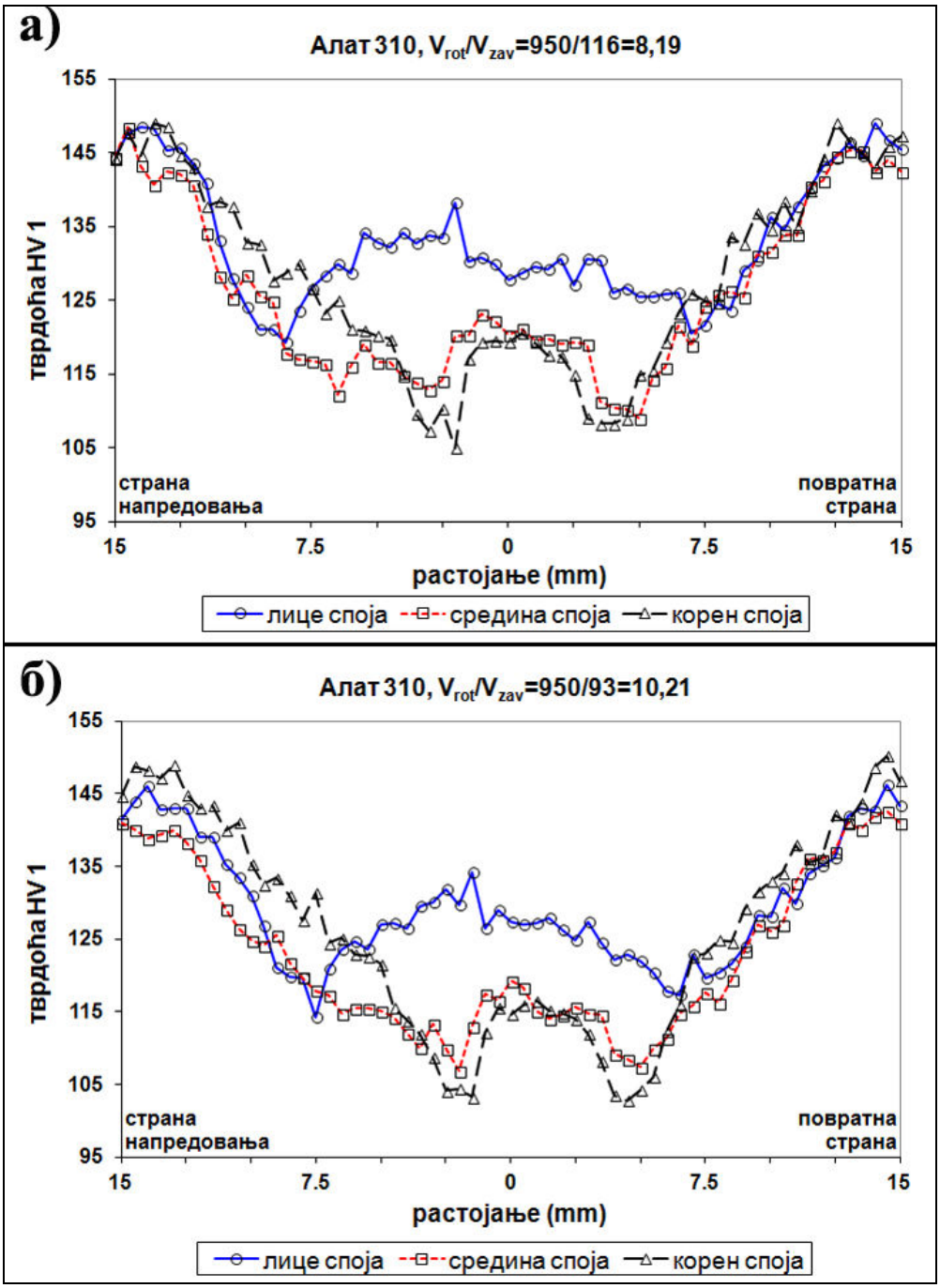
Расподела тврдоће кроз пресек споја генерално је симетрична у односу на центар споја а одговарајући дијаграми, без обзира на примењене параметре заваривања, имају „W“ облик карактеристичан за ову врсту легуре. У целом завареном споју дошло је до пада нивоа тврдоће у односу на основни материјал. Пад тврдоће је последица процеса опорављања до кога долази услед топлоте створене трењем током заваривања. Највећи пад тврдоће забележен је у ЗТМУ. Област грумена је део завареног споја са највећом тврдоћом, која у зависности од параметара заваривања може чак и да достигне ниво тврдоће основног материјала (Слика 4-22б, в). До пораста тврдоће у грумену долази услед смањења величине зрна и/или издвајања секундарне фазе а као последица изражене рекристализације у овој области споја. Генерално говорећи, тврдоћа у грумену веома зависи од брзине

ротације алата. Смањење V_{zav} генерално повећава ниво тврдоће у грумену. У области ЗТМУ и грумена, ниво тврдоће у близини лица споја (зона испод алата) је изразито већи у односу на средину и корену страну споја. Ово се објашњава двоструким утицајем алата у овој зони. Наиме, са једне стране услед делимичне рекристализације која се одвија у тој зони долази до уситњавања зрна и/или издвајања секундарних фаза а са друге стране долази до израженог присуства термомеханичког напрезања, што за последицу има пораст тврдоће у овој зони. Уочавају се два региона са најнижим нивоом тврдоће, један на страни напредовања а други на повратној страни споја при чему је тврдоћа у већини случајева готово иста. Гледано по дебљини узорка, брзина ротације и заваривања имају различит утицај на положај и тврдоћу ових региона. На кореној страни и средини споја, са повећањем брзине ротације при константној брзини заваривања не уочава се промена тврдоће (око 110HV) и показује веома мали утицај на положај региона, тј. растојање од центра споја (Слике 4-22б, 4-23а, 4-24а и 4-25а). Код лица споја тврдоћа ових региона је већа за неких 10HV (око 120HV) а растојање од центра споја је значајно веће. Са друге стране, повећање брзине заваривања при константној брзини ротације повећава ниво тврдоће ових региона и грумена уопште, али нема утицаја на њихов положај. Вредности тврдоће су у сагласности са резултатима затезних карактеристика, односно местом прелома епрувета.

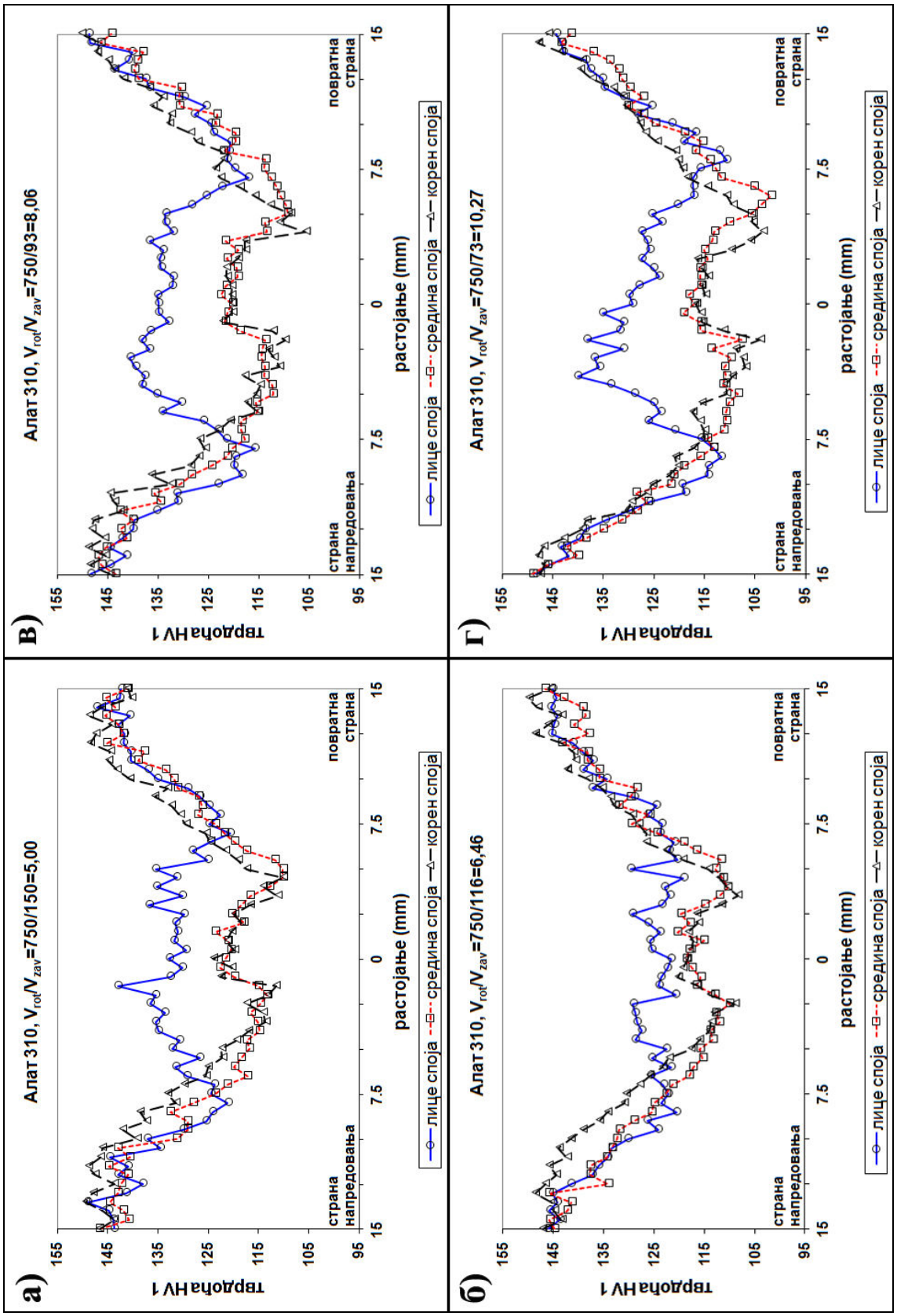
Мапирањем области споја на основу расподеле тврдоће, одређени су положај и простирање најслабијих критичних области у којима долази до лома. Уочава се да су региони са најнижом тврдоћом лоцирани у ЗТМУ, тачније у делу ЗТМУ непосредно уз линију додира ЗТМУ – грумен.



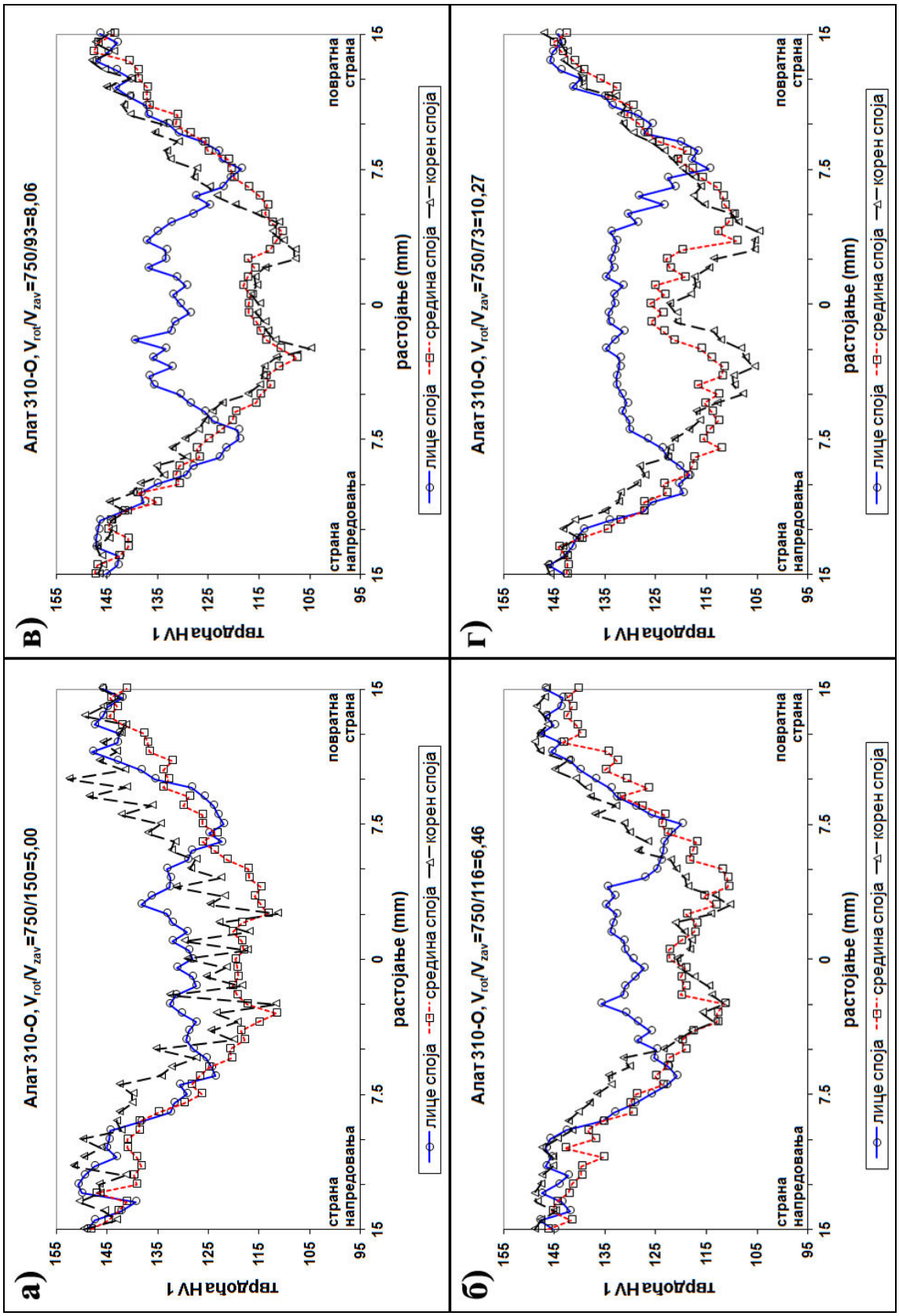
Слика 4-22. Расподела тврдоће кроз пресек споја у уздужном правцу (алат 310; V_{rot}=1180 obr/min).



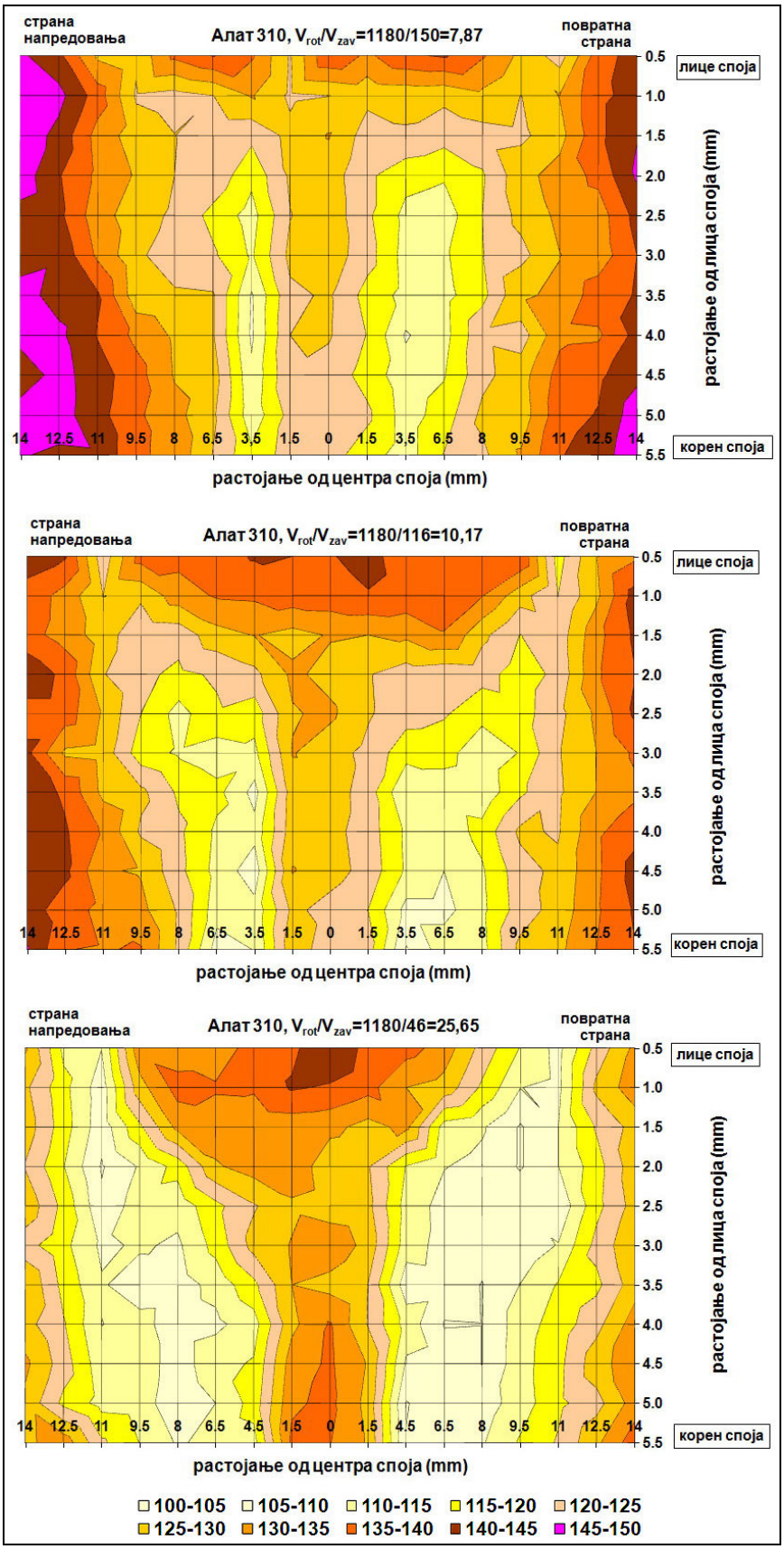
Слика 4-23. Расподела тврдоће кроз пресек споја у уздужном правцу (алат 310; V_{rot}=950 obr/min).



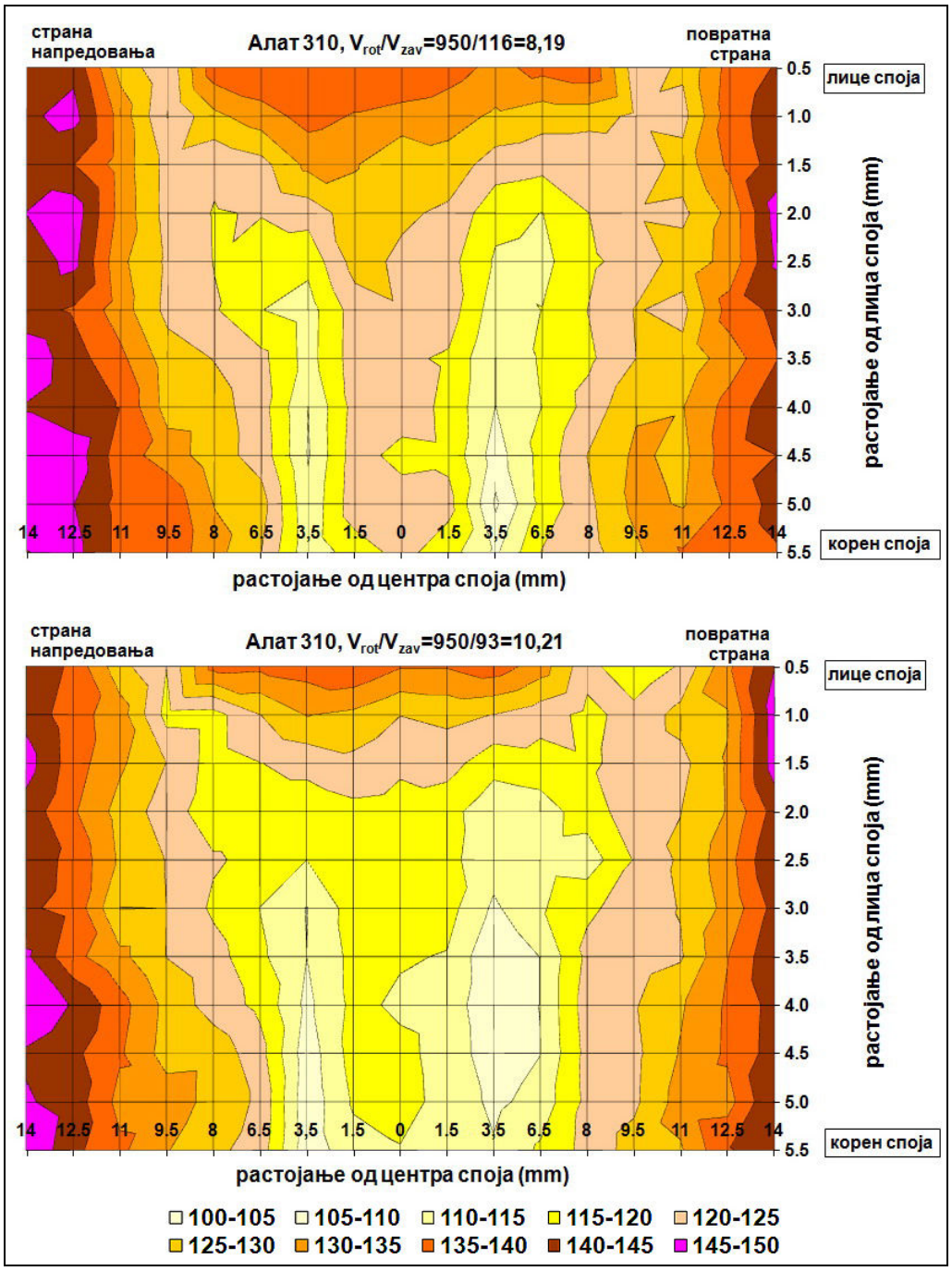
Слика 4-24. Расподела тврдоће кроз пресек споја у уздужном правцу (алат 310; V_{rot}=750 obr/min).



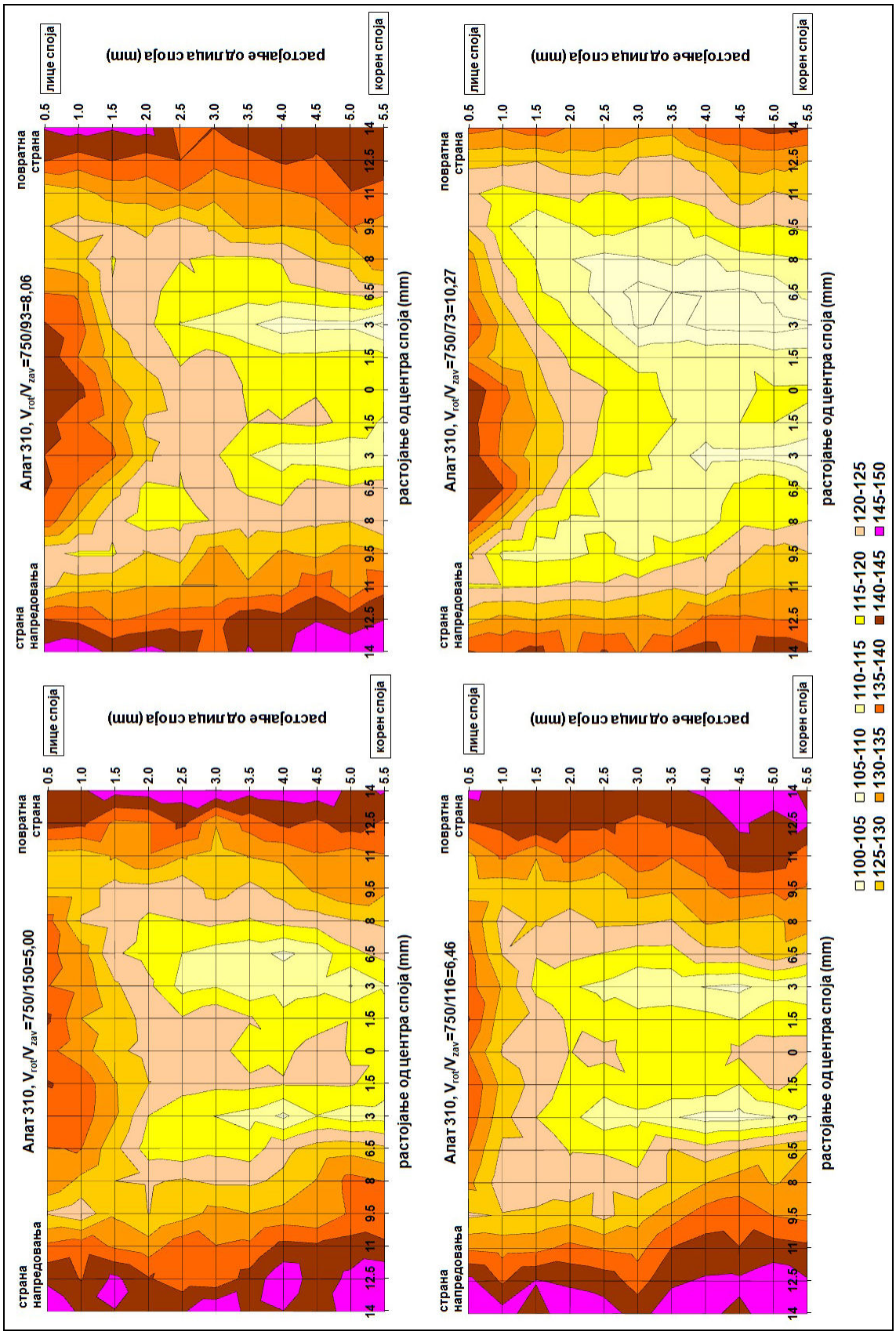
Слика 4-25. Расподела тврдоће кроз пресек споја у уздужном правцу (алат 310-О; V_{rot}=750 obr/min).



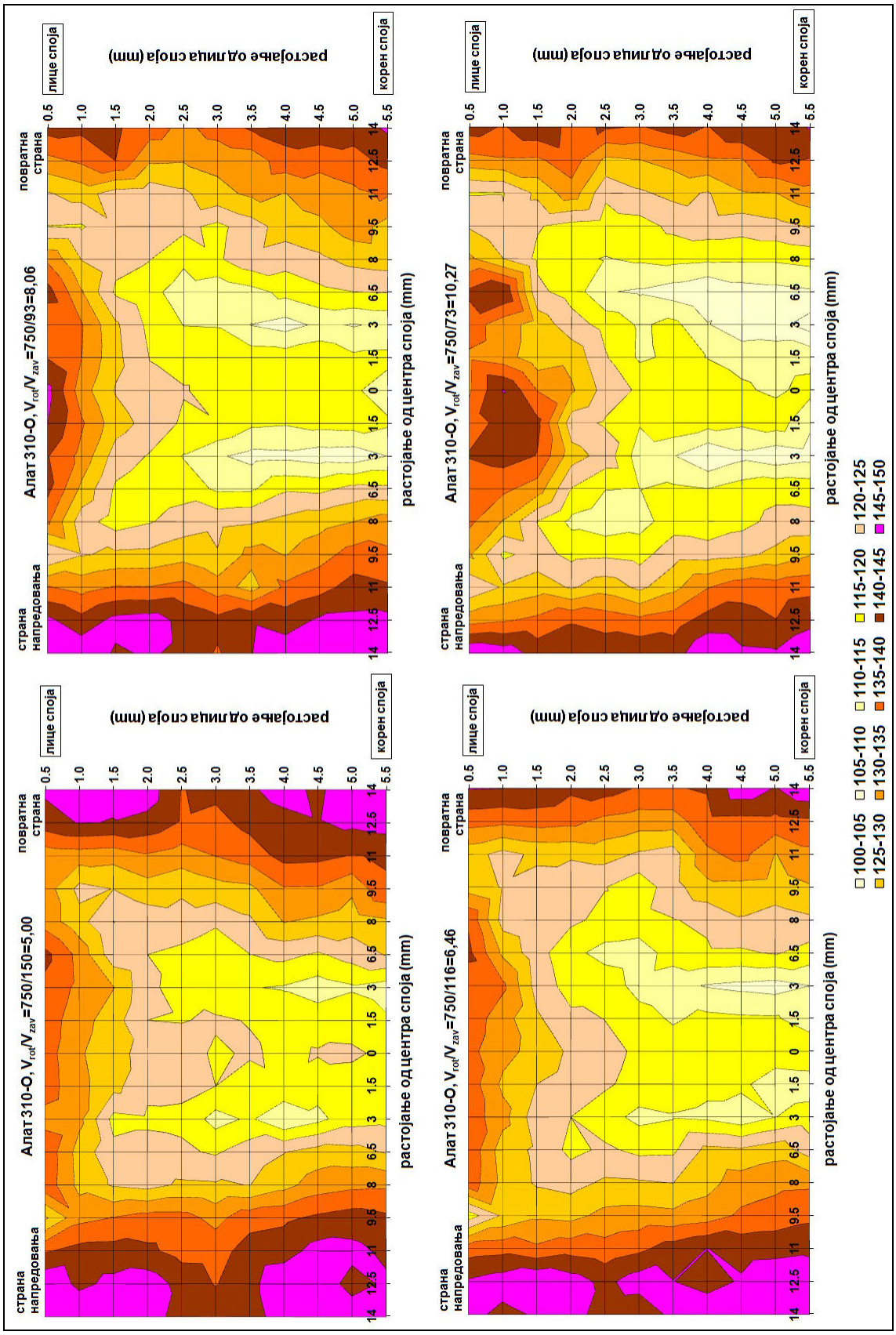
Слика 4-26. Мапирање области споја на основу расподеле тврдоће (алат 310; V_{rot}=1180 obr/min).



Слика 4-27. Мапирање области споја на основу расподеле тврдоће (алат 310; V_{rot}=950 obr/min).



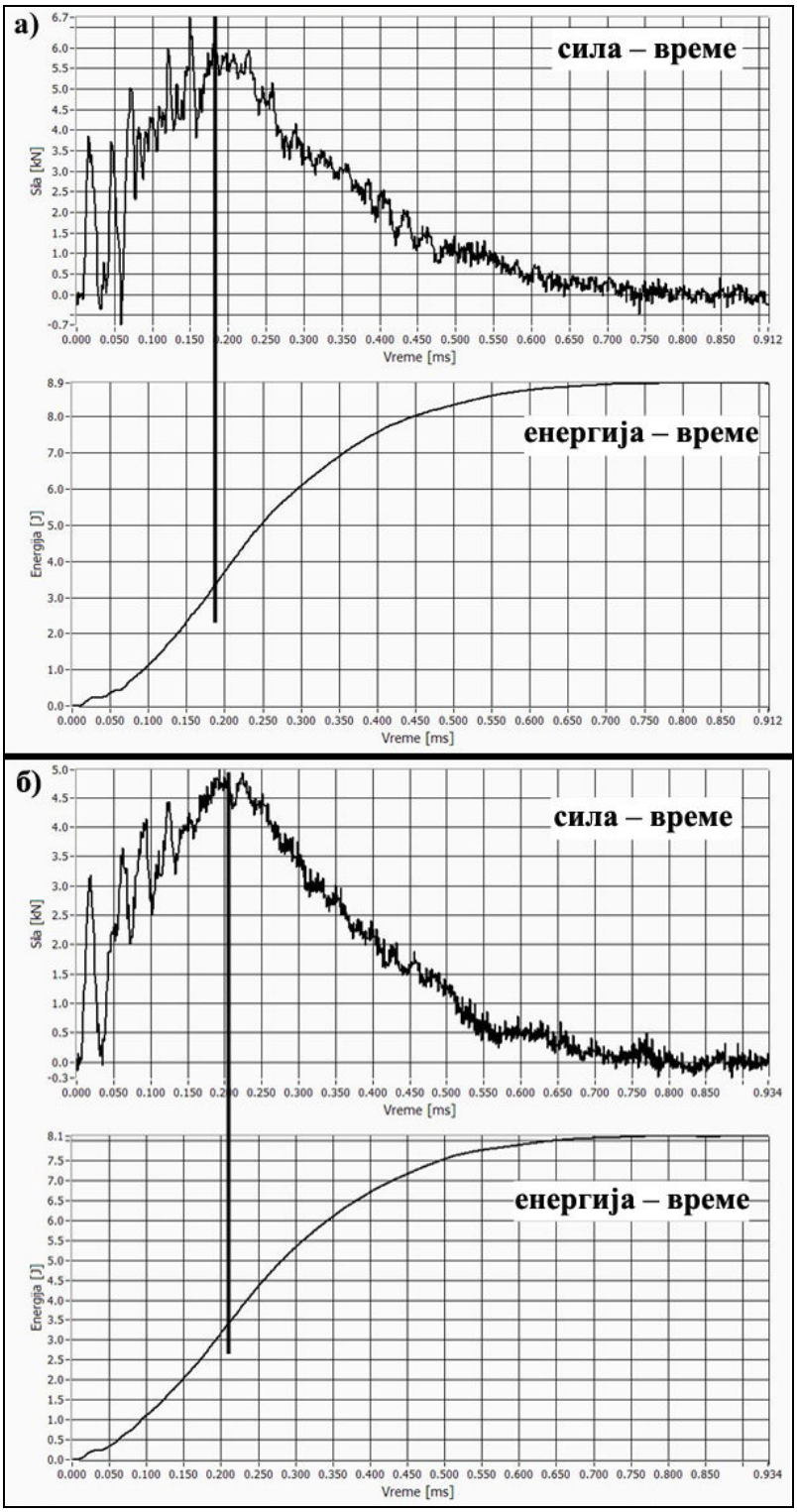
Слика 4-28. Мапирање области споја на основу расподеле тврдоће (алат 310; V_{rot}=750 obr/min).



Слика 4-29. Мапирање области споја на основу расподеле тврдоће (алат 310-O; V_{rot}=750 obr/min).

4.6. УДАРНА ЖИЛАВОСТ СПОЈЕВА ЛЕГУРЕ 2024-T351

Карактеристичан изглед дијаграма сила-време и енергија-време, ОМ и завареног споја, приказан је сликом 4-30.



Слика 4-30. Дијаграм сила-време и енергија-време за: **а)** ОМ; **б)** заварени спој.

Крива сила – време приказује промену силе са временом и са ње се очитава максимална сила. На почетку криве сила – време уочавају се пикови који настају као последица одскакања клатна од узорка а пад силе између њих односи се на тренутак растерећења узорка при одбијању клатна. Крива енергија – време приказује промену енергије са временом а представља количину абсорбоване енергије од стране испитиваног узорка, односно изражава способност материјала да се супростави расту прскотине. Са ње се очитава укупна максимална количина енергије утрошена за лом узорка. Преклапањем дијаграма сила-време и енергија-време на посредан начин се одређују енергије стварања и раста прскотине, а које у свом збиру дају укупну енергију удара. Енергије стварања и раста прскотине су одређене тако што је из максималне вредности силе (крива сила – време) спуштена вертикала. Тачка пресека вертикале и криве енергија – време представља вредност енергије стварања прскотине а остатак до укупне енергије удара је енергија раста прскотине.

Средње вредности резултата одређивања енергије удара, ударне жилавости, енергије стварања и ширења прскотине заварених спојева и ОМ дати су у Табели 4.7. У Табели 4.7 и на сликама 4-31, 4-32 и 4-33 приказан је и однос укупних енергија удара завареног споја ($E_{укЗС}$) и ОМ ($E_{укОМ}$), однос енергија стварања прскотине завареног споја ($E_{ствЗС}$) и ОМ ($E_{ствОМ}$), однос енергија ширења прскотине завареног споја ($E_{ширЗС}$) и ОМ ($E_{ширОМ}$) као и удео енергија стварања и ширења у укупној енергији удара.

Енергије удара ($E_{ук}$) спојева заварених алатом 310-О генерално су веће у односу на спојеве заварене алатом 310. За спојеве заварене алатом 310 највећа вредност енергије удара добијена је за комбинацију V_{rot}/V_{zav} = 750/73 = 10,27 и износи 7,90 J. За спојеве заварене алатом 310-О највећа вредност енергије удара износи 8,35 J и добијена је за комбинацију параметара V_{rot}/V_{zav} = 750/116 = 6,46. Резултати одређивања енергије удара указују да брзина заваривања нема једнозначан утицај на ударну жилавост споја. Смањење брзине заваривања повећава ударну жилавост споја при V_{rot}=750 obr/min. Са друге стране при V_{rot}=1180 obr/min са смањењем брзине заваривања долази до смањења вредности енергије удара. Код спојева заварених алатом 301-О оваква зависност није утврђена. Овакво понашање може се објаснити улогом коју различита количина генерисане топлоте, при различитим

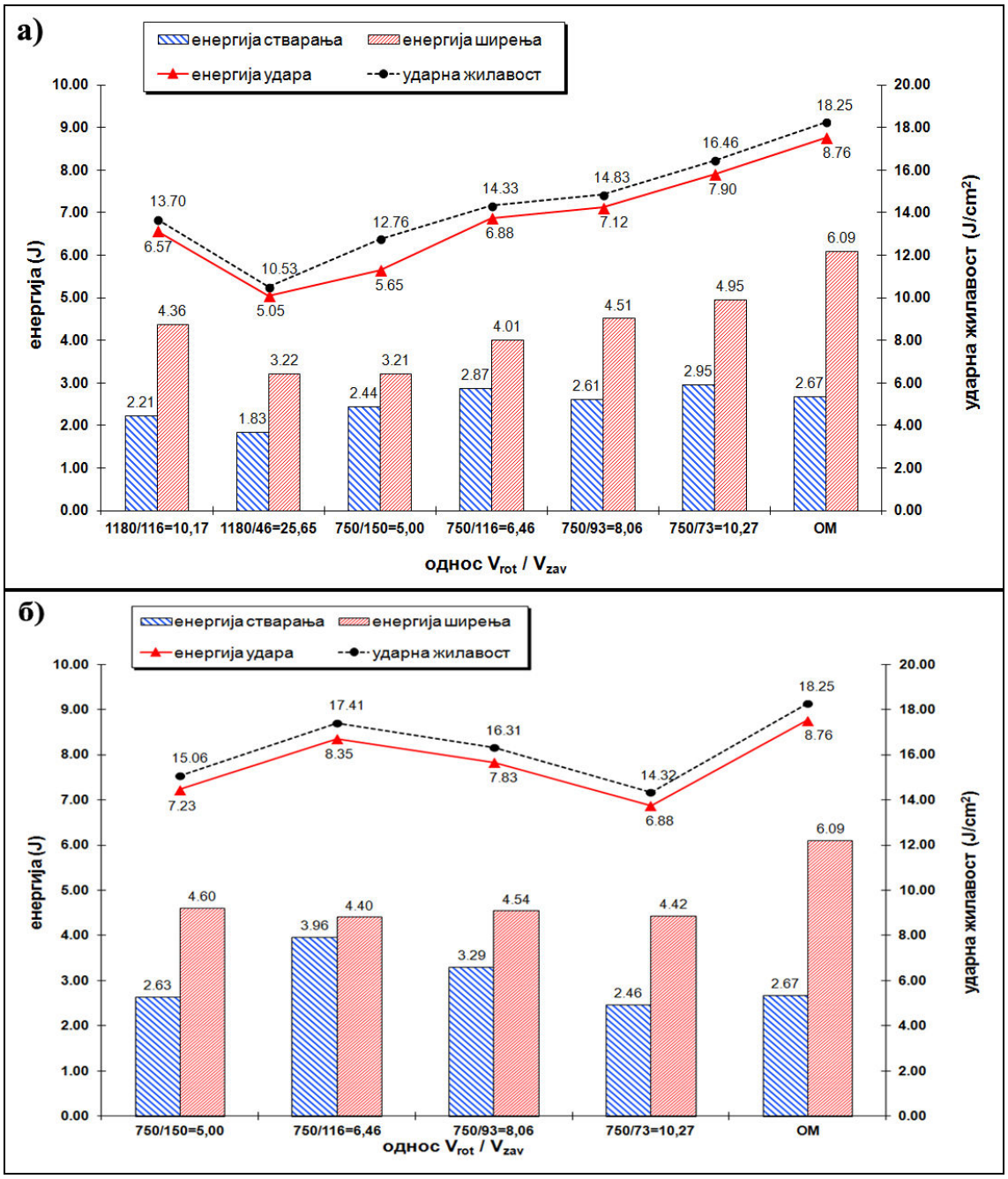
параметрима заваривања, има на формирање споја. Вредности енергије удара ($E_{ук}$) спојева заварених алатом 310 су на нивоу од 58% до 90% у односу на енергију удара ОМ, односно од 78% до 95% за спојеве заварене алатом 310-О (Табела 4.7 и Слика 4-32).

За спојеве заварене алатом 310 највећа вредност енергије стварања прскотине ($E_{ств}$) добијена је за комбинацију V_{rot}/V_{zav} = 750/73 = 10,27 и износи 2,95 J. За спојеве заварене алатом 310-О највећа вредност $E_{ств}$ износи 3,96 J и добијена је за комбинацију параметара V_{rot}/V_{zav} = 750/116 = 6,46. Најмања вредност $E_{ств}$ прскотине од 1,83 J добијена је за спој заварен алатом 310 при V_{rot}/V_{zav} = 1180/46 = 25,65. Вредности $E_{ств}$ прскотине спојева заварених алатом 310 су на нивоу од 69% до 110% у односу на $E_{ств}$ ОМ, односно од 92% до 148% за спојеве заварене алатом 310-О (Табела 4.7 и Слика 4-32). Удели енергија стварања прскотине у укупној енергији удара, за заварене спојеве су приближно истих вредности за оба коришћена алата и већи су од удела енергије стварања прскотине код ОМ, која износи 30%. Вредности $E_{ств}$ прскотине код спојева крећу се у распону од 34% до 49% од укупне вредности енергије удара споја (Слика 4-33).

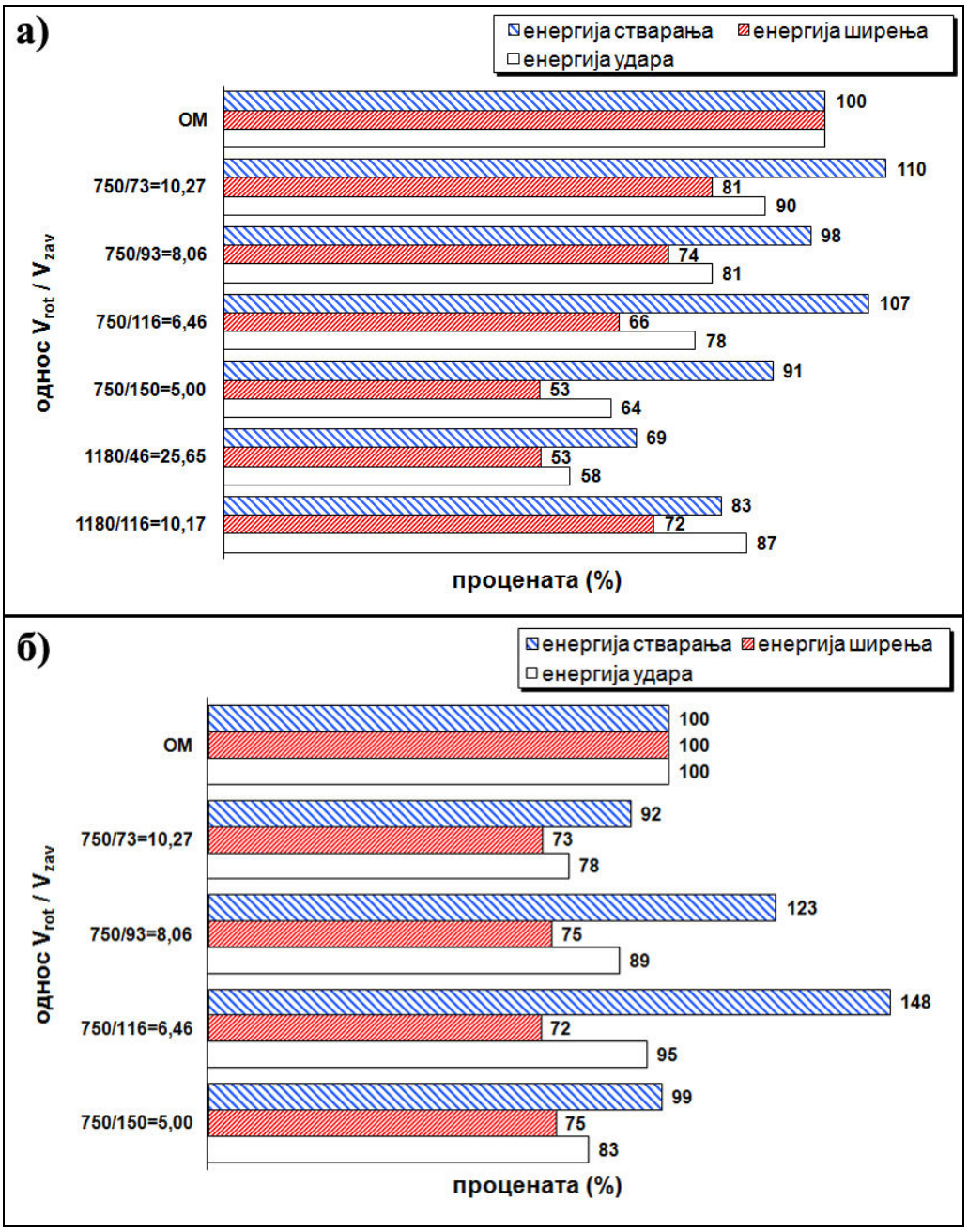
Енергије ширења прскотине ($E_{шир}$) код заварених спојева су у свим случајевима ниже од $E_{шир}$ прскотине код ОМ и крећу се у распону од 3,21 до 4,95 J за спојеве заварене алатом 310, односно од 4,40 до 4,60 J за спојеве заварене алатом 310-О. Вредности $E_{шир}$ прскотине спојева заварених алатом 310 су на нивоу од 53% до 81% у односу на $E_{ств}$ ОМ, односно од 72% до 75% за спојеве заварене алатом 310-О (Табела 4.7 и Слика 4-32). Удели енергија ширења прскотине у укупној енергији удара, за заварене спојеве су приближно истих вредности за оба коришћена алата и мањи су од удела енергије стварања прскотине код ОМ, која износи 70%. Вредности $E_{шир}$ прскотине спојева крећу се у распону од 51% до 66% од укупне вредности енергије удара споја (Слика 4-33).

Табела 4.7. Средње вредности резултата одређивања енергије удара.

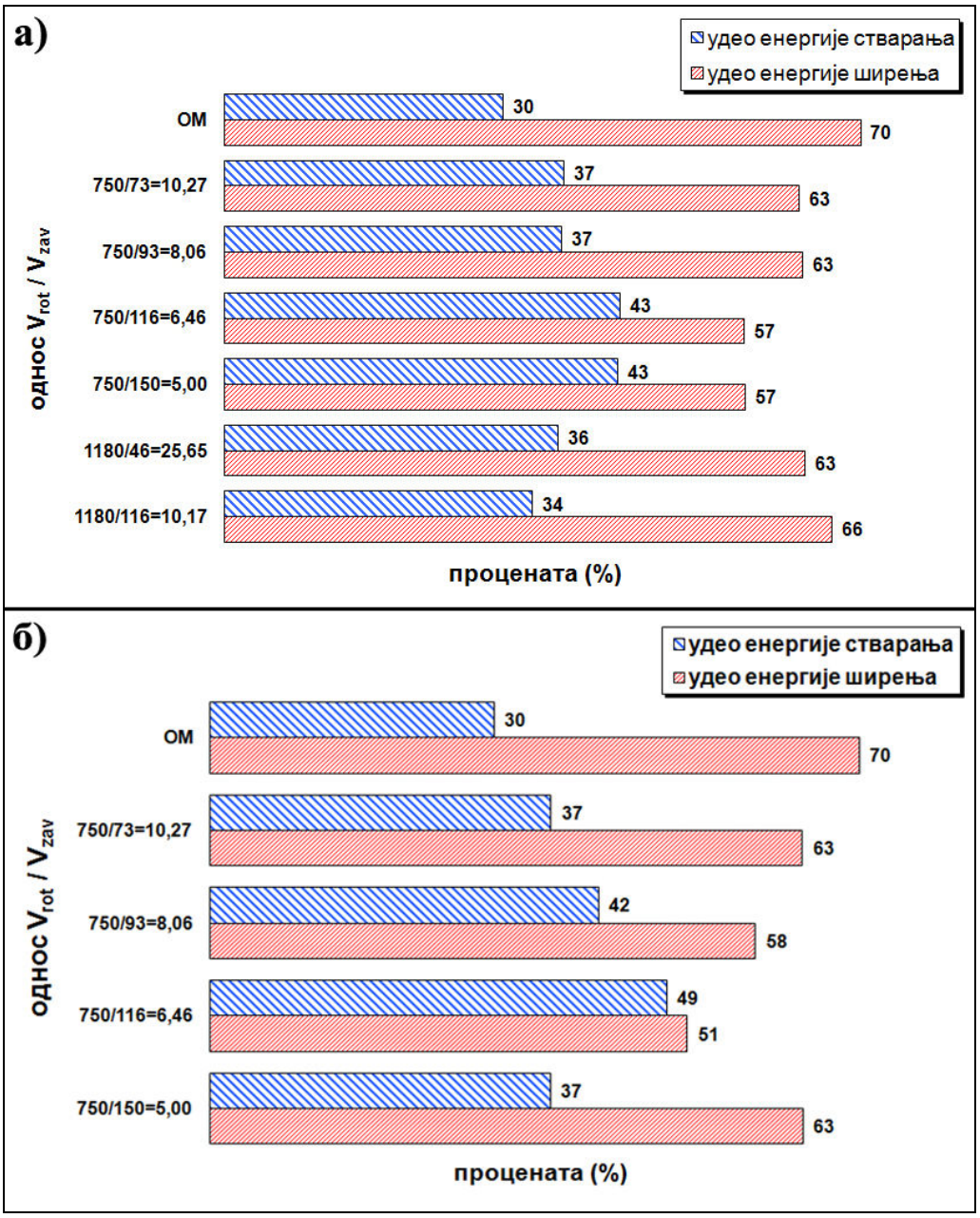
параметри заваривања (V_{rot}/V_{zav})	енергија удара $E_{ук}$ (J)	енергија стварања $E_{ств}$ (J)	енергија ширења $E_{шир}$ (J)	ударна жилавост (J/cm^2)	однос $E_{ук}$ ЗС/ОМ (%)	однос $E_{ств}$ ЗС/ОМ (%)	однос $E_{шир}$ ЗС/ОМ (%)	удео $E_{ств}$ у $E_{ук}$ (%)	удео $E_{шир}$ у $E_{ук}$ (%)
алат 310									
1180/116=10,17	6,57	2,21	4,36	13,70	75,00	82,82	71,59	33,62	66,37
1180/46=25,65	5,05	1,83	3,22	10,53	57,67	68,60	52,82	36,48	63,47
750/150=5,00	5,65	2,44	3,21	12,76	64,49	91,43	52,65	43,04	56,97
750/116=6,46	6,88	2,87	4,01	14,33	78,49	107,30	65,80	43,20	56,77
750/93=8,06	7,12	2,61	4,51	14,83	81,25	97,66	74,01	36,87	63,12
750/73=10,27	7,90	2,95	4,95	16,46	90,17	110,20	81,32	37,14	62,84
алат 310-О									
750/150=5,00	7,23	2,63	4,60	15,06	82,53	98,53	75,48	36,51	63,49
750/116=6,46	8,35	3,96	4,40	17,41	95,37	147,99	72,24	48,89	51,11
750/93=8,06	7,83	3,29	4,54	16,31	89,39	123,23	74,50	41,60	58,40
750/73=10,27	6,88	2,46	4,42	14,32	78,48	91,86	72,59	36,55	63,45
ОМ	8,76	2,67	6,09	18,25	100,00	100,00	100,00	30,47	69,55



Слика 4-31. Средње вредности ударне жилавости, енергије удара, енергија стварања и ширења прслине за спојеве заварене алатом: **а)** 310; **б)** 310-О.



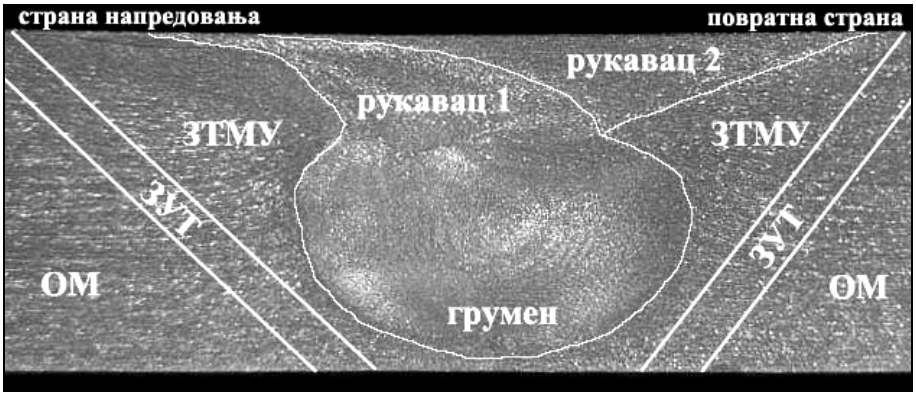
Слика 4-32. Средње вредност енергије удара, енергије стварања и ширења прскотине код заварених спојева у односу на енергије ОМ: **а)** спојеви заварени алатом 310; **б)** спојеви заварени алатом 310-О.



Слика 4-33. Средње вредности удела енергија стварања и ширења прскотине у укупној енергији удара за спојеве заварене алатом: **а)** 310; **б)** 310-О.

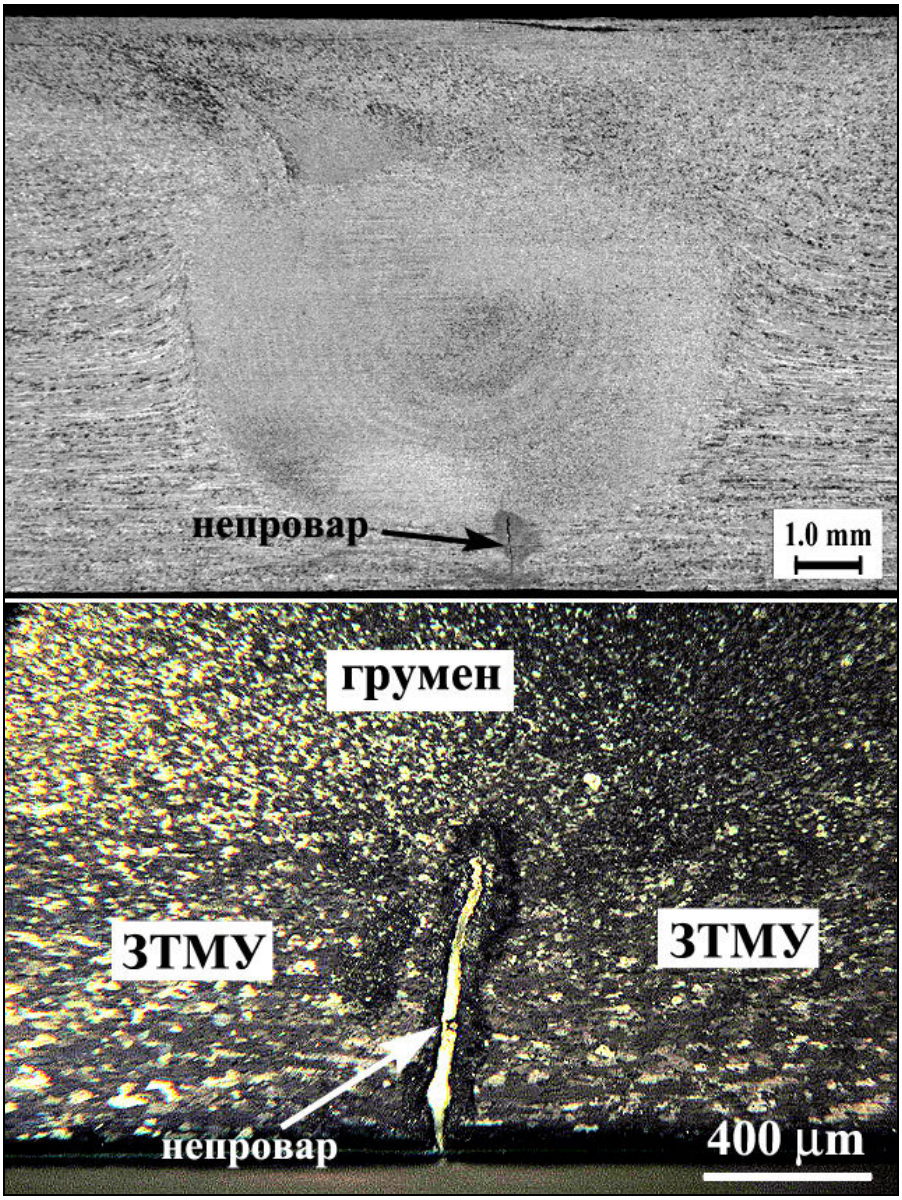
4.7. КАРАКТЕРИЗАЦИЈА СТРУКТУРЕ

У оквиру металографских испитивања урађена је макро и микроструктурна анализа заварених спојева и његових области. Карактеристична макроструктура попречног пресека споја и положај његових области (грумен, рукавац, ЗТМУ, ЗУТ) приказани су сликом 4-34.



Слика 4-34. Спој заварен FSW поступком – области споја.

Металографском анализом потврђено је постојање скривене грешке типа непровара на кореној страни споја, чије присуство је уочено код спојева легуре 5052-H32 при испитивањима затезањем и савијањем (Слика 4-35). Присуство грешке и њено простирање је постало уочљиво тек након јако интензивног нагризања узорка.

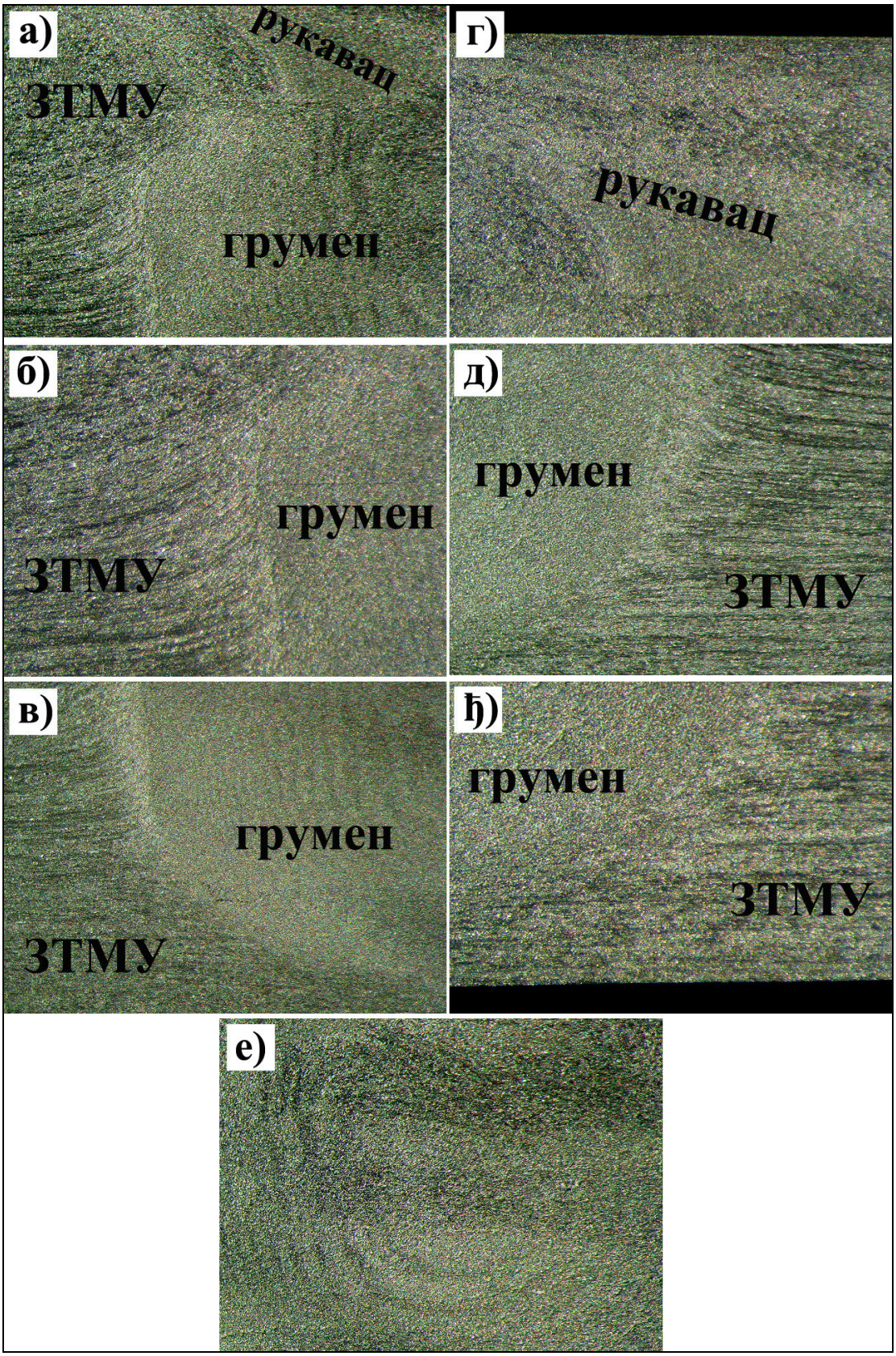


Слика 4-35. Скривена грешка типа непровара на кореној страни споја.

4.7.1. Макроструктурна анализа

4.7.1.1. Макроструктура спојева легуре 5052-H32

Типичан макроскопски изглед попречног пресека заварених спојева легуре 5052-H32 приказан је сликом 4-36. Јасно се уочавају карактеристичне области споја као што су грумен са препознатљивом прстенастом структуром, ЗТМУ са веома деформисаним зрнима и рукавац, њихов положај и облик. Јасно изражене линије течења материјала указују на карактер и смер тока материјала при одвијању процеса заваривања.



Слика 4-36. Карактеристичне области споја легуре 5052 заварене при односу V_{rot}/V_{zav} = 600/93 = 6,45: **а-в)** граница грумен-ЗТМУ на страни напредовања; **г)** рукавац; **д-ђ)** граница грумен-ЗТМУ на повратној страни; **е)** грумен.

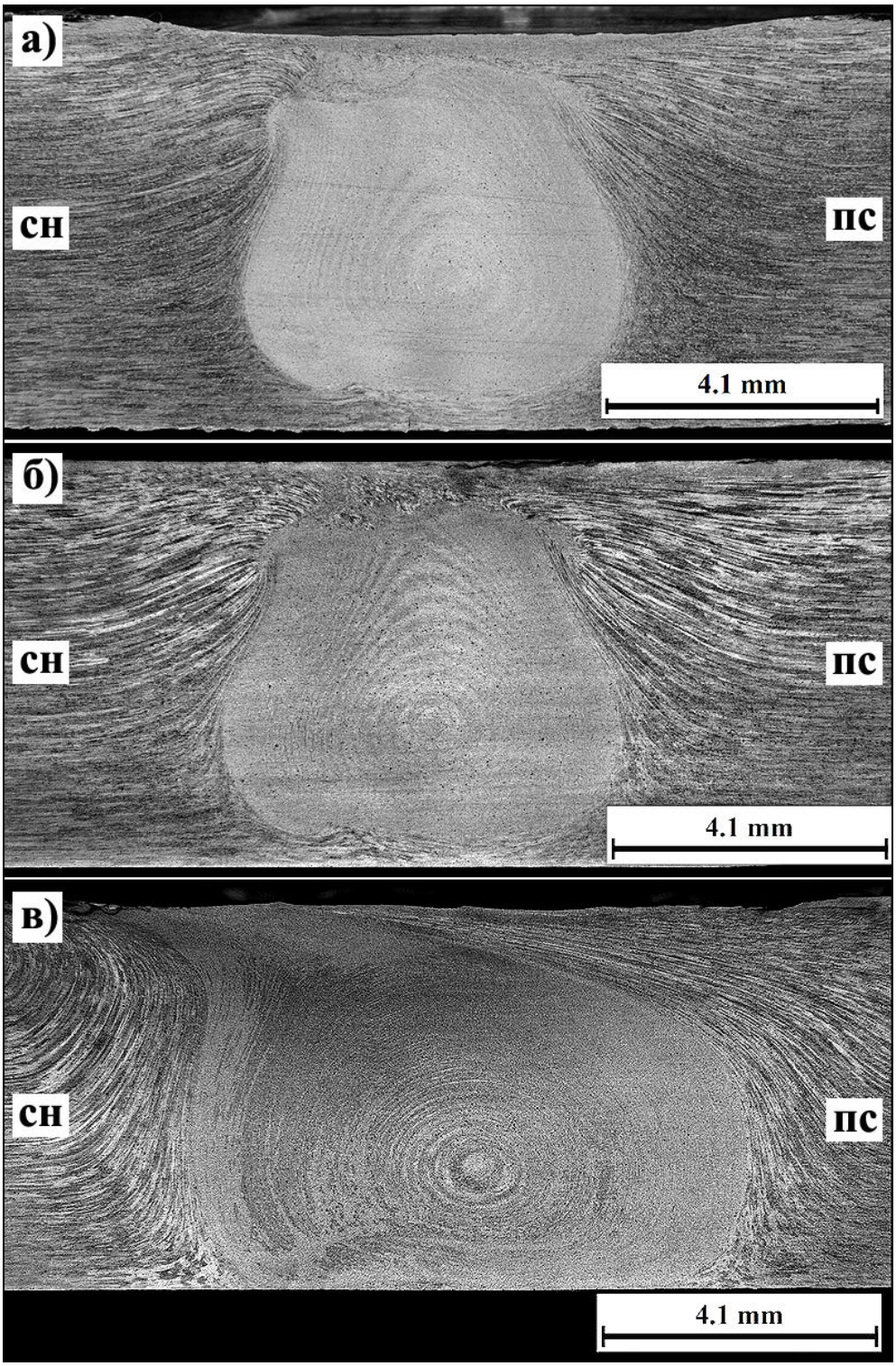
4.7.1.2. Макроструктура спојева легуре 2024-3351

Карактеристични макроскопски изгледи попречних пресека заварених спојева легуре 2024-Т351 дати су у односу на коришћени алат и брзину ротације алата а приказани су сликама 4-37 до 4-40. Уочава се да простирање линије течења у ЗТМУ као и величина и облик грумена зависе од параметара заваривања. У Табели 4.8 дати су подаци о димензијама грумена у зависности од примењених параметара заваривања и коришћеног алата. Начин и места мерења димензија грумена дати су у Прилогу В. Макроструктура пресека излазних рупа алата дата је у Прилогу Г. Пресек излазних рупа разматран је са становишта формирања завареног споја, односно течења материјала под утицајем алата при различитим параметрима заваривања.

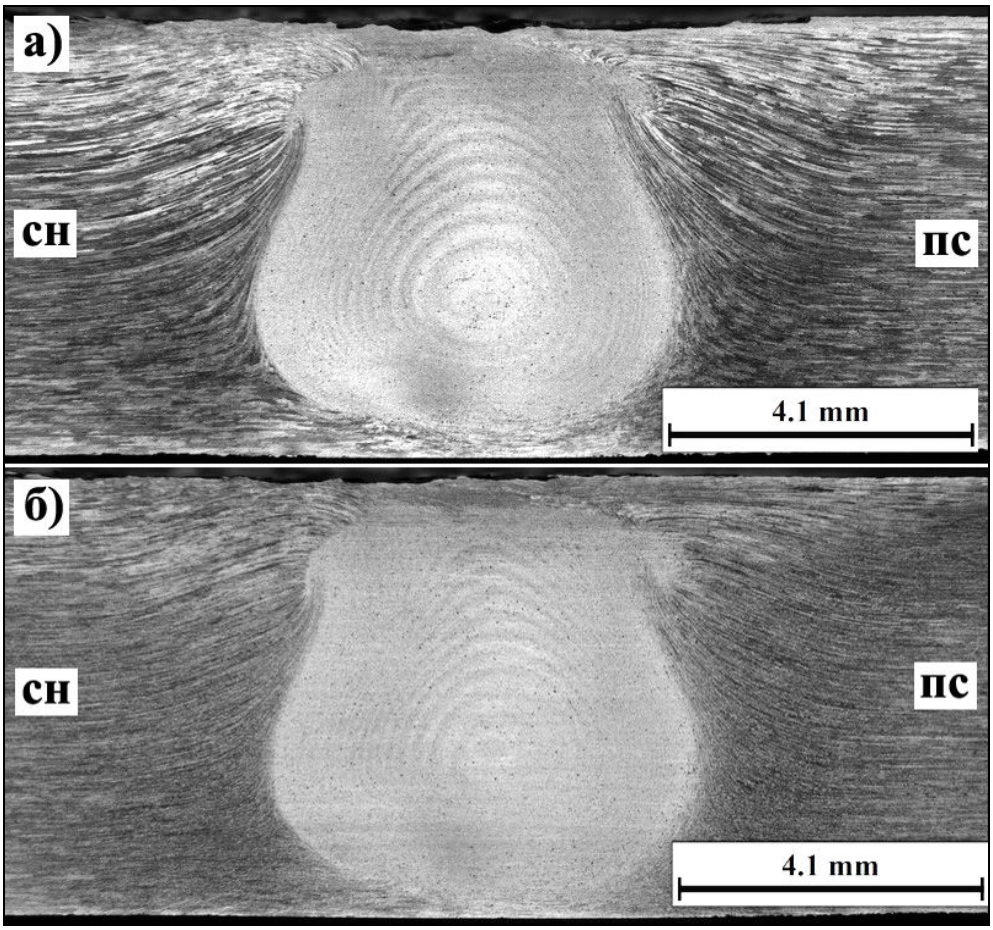
Макро испитивањима попречног пресека заварених спојева уочено је постојање области грумена, ЗТМУ и ЗУТ-а, њихов положај и облик. Јасно изражене линије течења материјала указују на карактер и смер тока материјала при одвијању процеса заваривања. Положај, простирање и израженост линија течења зависи од количине унете енергије, односно параметара заваривања. Величина грумена се при истој брзини ротације алата повећава при смањењу брзине заваривања, услед веће количине унете енергије.

Табела 4.8. Димензије грумена

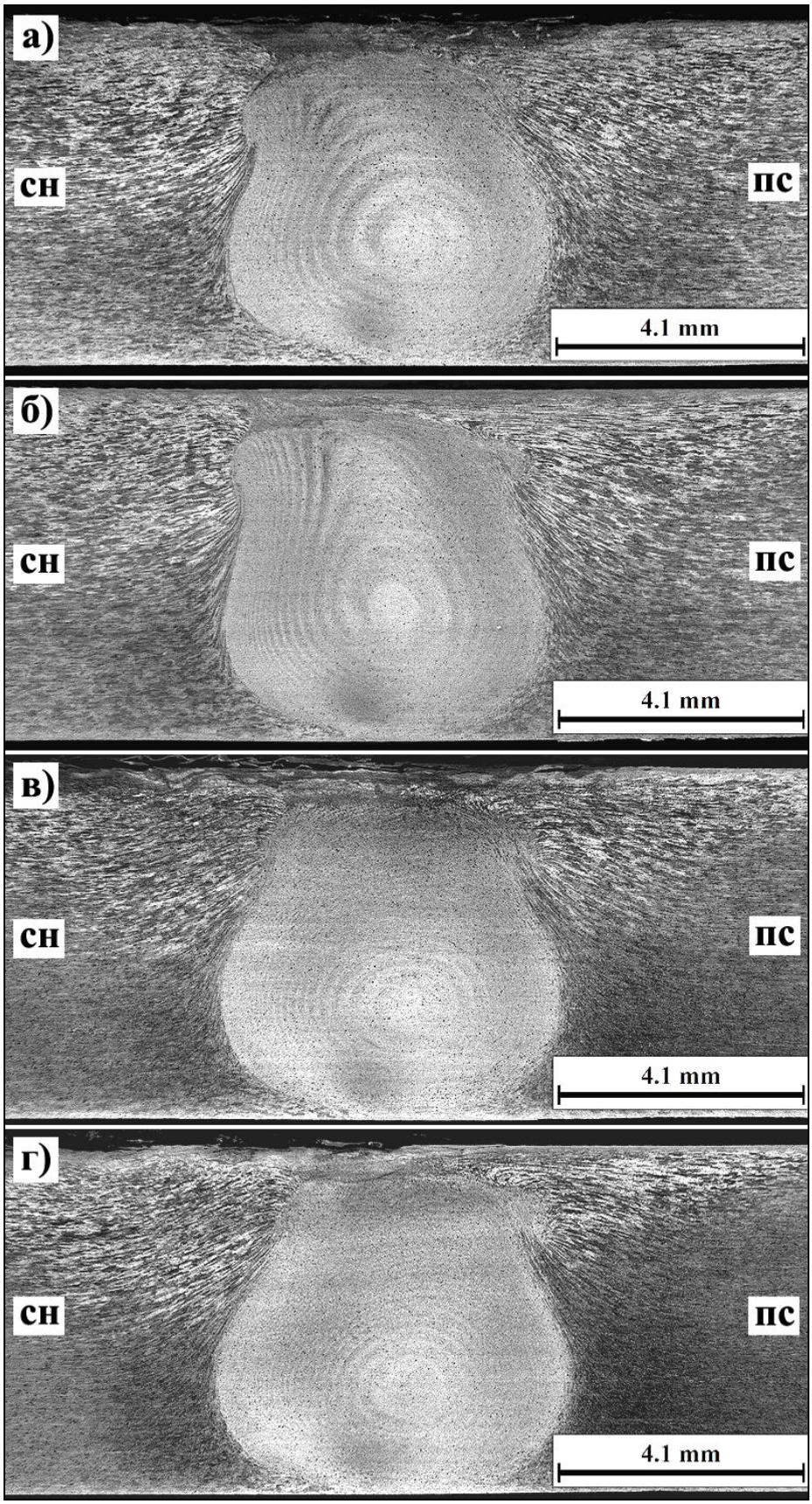
параметри заваривања (Vrot/Vzav)	димензије грумена		
	ширина (mm)	обим (mm)	површина (mm2)
алат 310			
1180/150=7,87	5.671	19.269	24.276
1180/116=10,17	5.922	18.500	24.536
1180/46=25,65	8.417	25.634	40.382
950/116=8,19	5.725	19.962	24.303
950/93=10,21	5.671	20.476	26.137
750/150=5,00	5.340	18.221	23.165
750/116=6,46	5.316	18.622	24.218
750/93=8,06	5.690	18.922	24.321
750/73=10,27	6.062	19.776	25.924
алат 310-О			
750/150=5,00	5.023	18.936	23.432
750/116=6,46	5.270	19.704	24.213
750/93=8,06	5.359	19.119	23.896
750/73=10,27	5.774	18.500	24.086



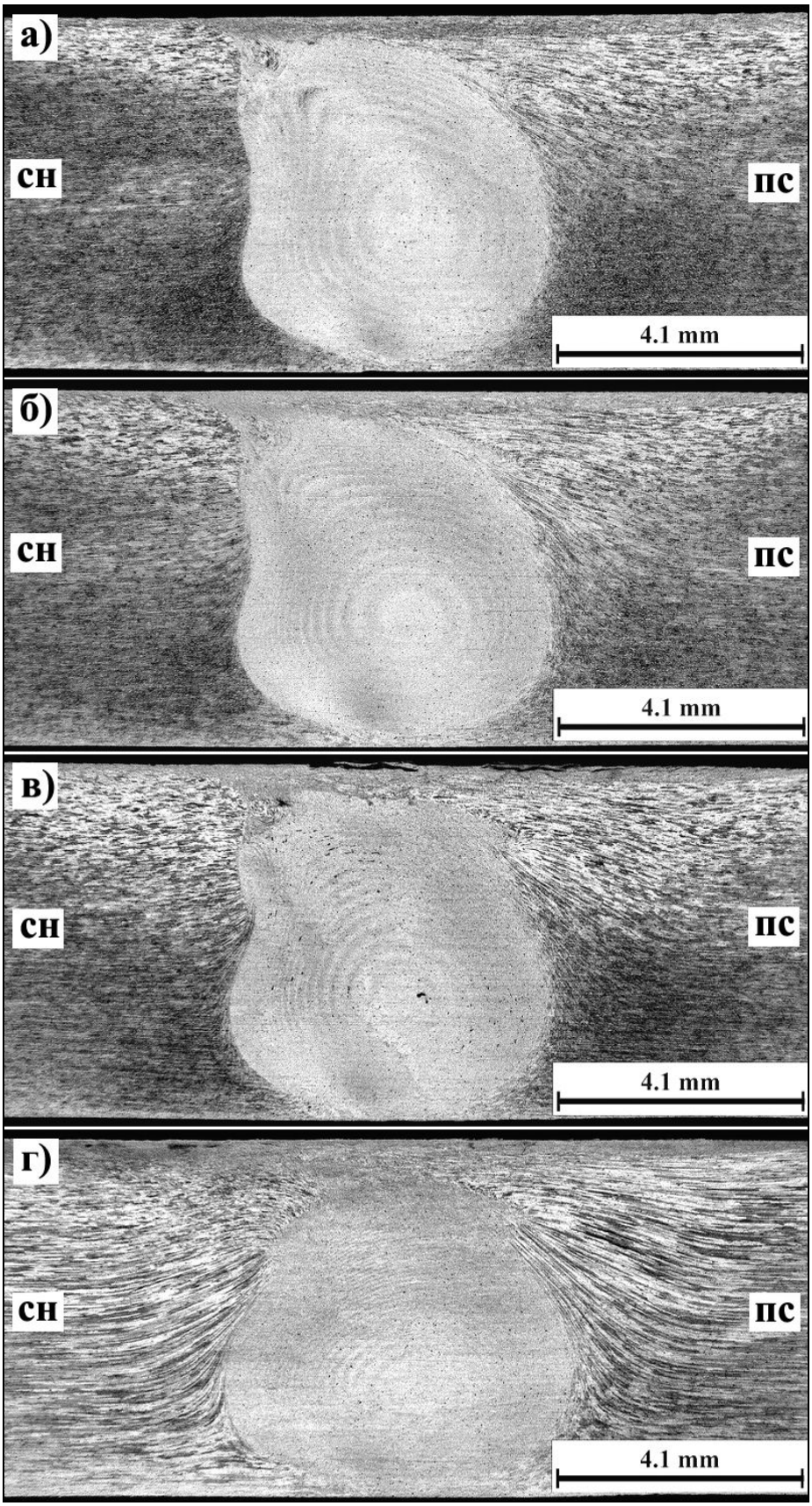
Слика 4-37. Макроструктура попречних пресека спојева заварених алатом 310 при V_{rot}=1180 obr/min и V_{zav} (mm/min) од: **а)** 150; **б)** 116; **в)** 46.



Слика 4-38. Макроструктура попречних пресека спојева заварених алатом 310 при V_{rot}=950 obr/min и V_{zav} (mm/min) од: **а)** 116; **б)** 93.



Слика 4-39. Макроструктура попречних пресека спојева заварених алатом 310 при V_{rot}=750 obr/min и V_{zav} (mm/min) од: **а)** 150; **б)** 116; **в)** 93; **г)** 73.

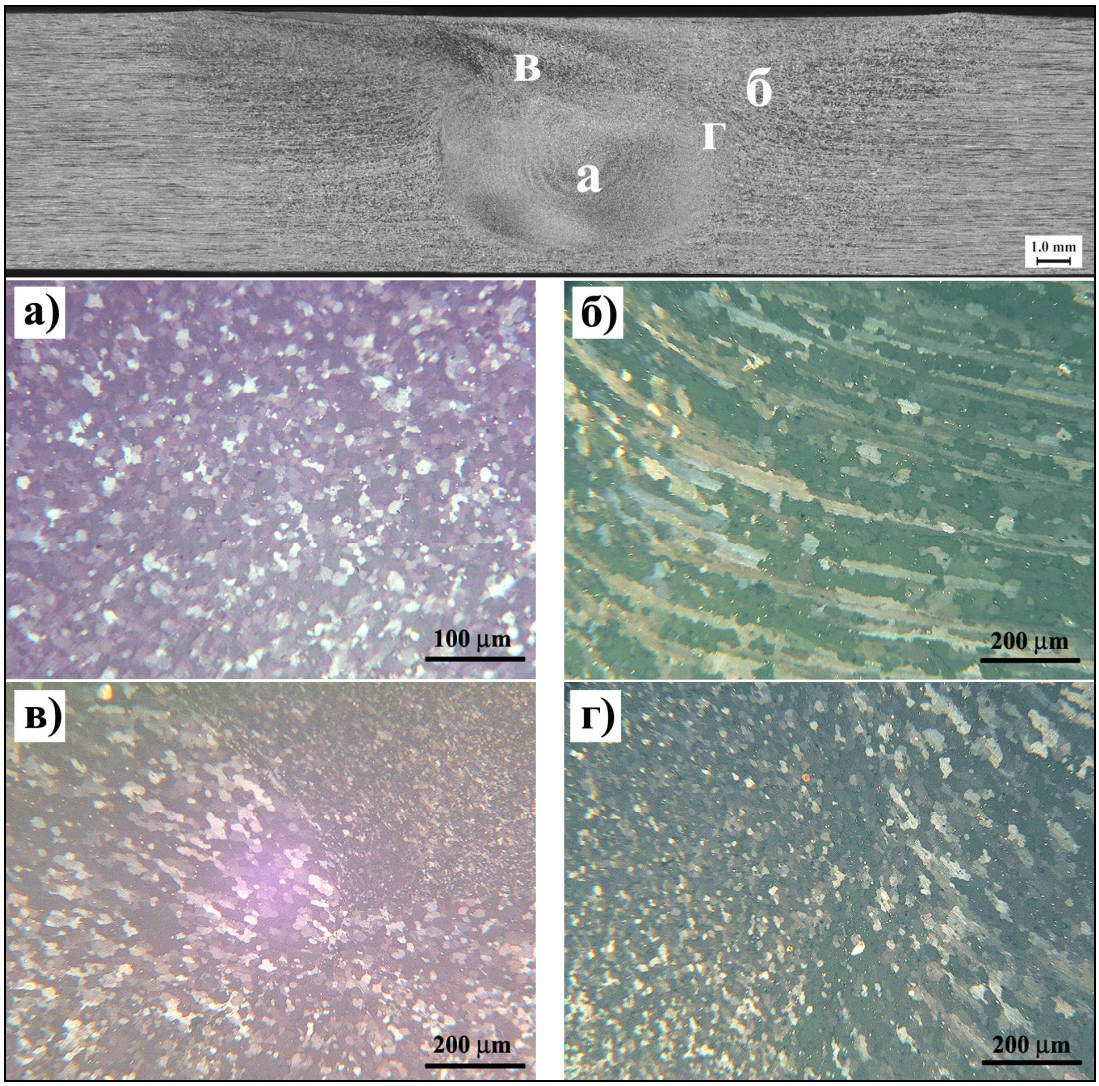


Слика 4-40. Макроструктура попречних пресека спојева заварених алатом 310-О при V_{rot}=750 obr/min и V_{zav} (mm/min) од: **а)** 150; **б)** 116; **в)** 93; **г)** 73.

4.7.2. Микроструктурна анализа

4.7.2.1. Микроструктура спојева легуре 5052-H32

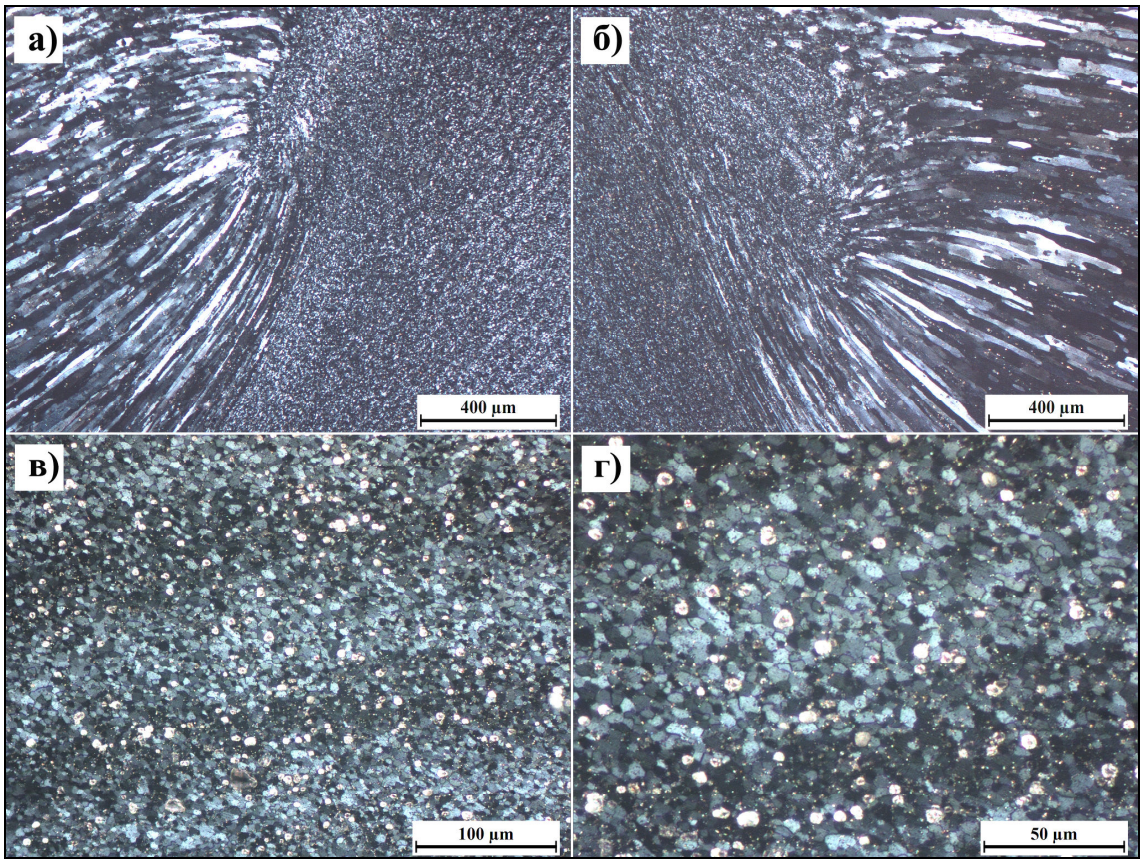
Изглед микроструктуре у различитим областима завареног споја легуре 5052-H32 приказана је сликом 4-41. У завареном споју се запажа велика нехомогеност у структури. Зрна су различитог облика, од једнакоосних до јако издужених. У ЗТМУ се запажа највећа међусобна разлика у величини зрна. У грумену је присутна веома ситнозрна структура док се ЗТМУ карактерише издуженим, ка лицу споја савијеним, зрнима а уочава се и присуство једнакоосних зрна. Област ЗУТ-а јеслабо изражена и не може се јасно одредити.



Слика 4-41. Микроструктура завареног споја легуре 5052 при односу V_{rot}/V_{zav} = 600/93 = 6,45: **а)** грумен; **б)** ЗТМУ; **в)** граница грумен-ЗТМУ на страни напредовања и рукавац; **г)** граница грумен-ЗТМУ на повратној страни.

4.7.2.2. Микроструктура спојева легуре 2024-T351

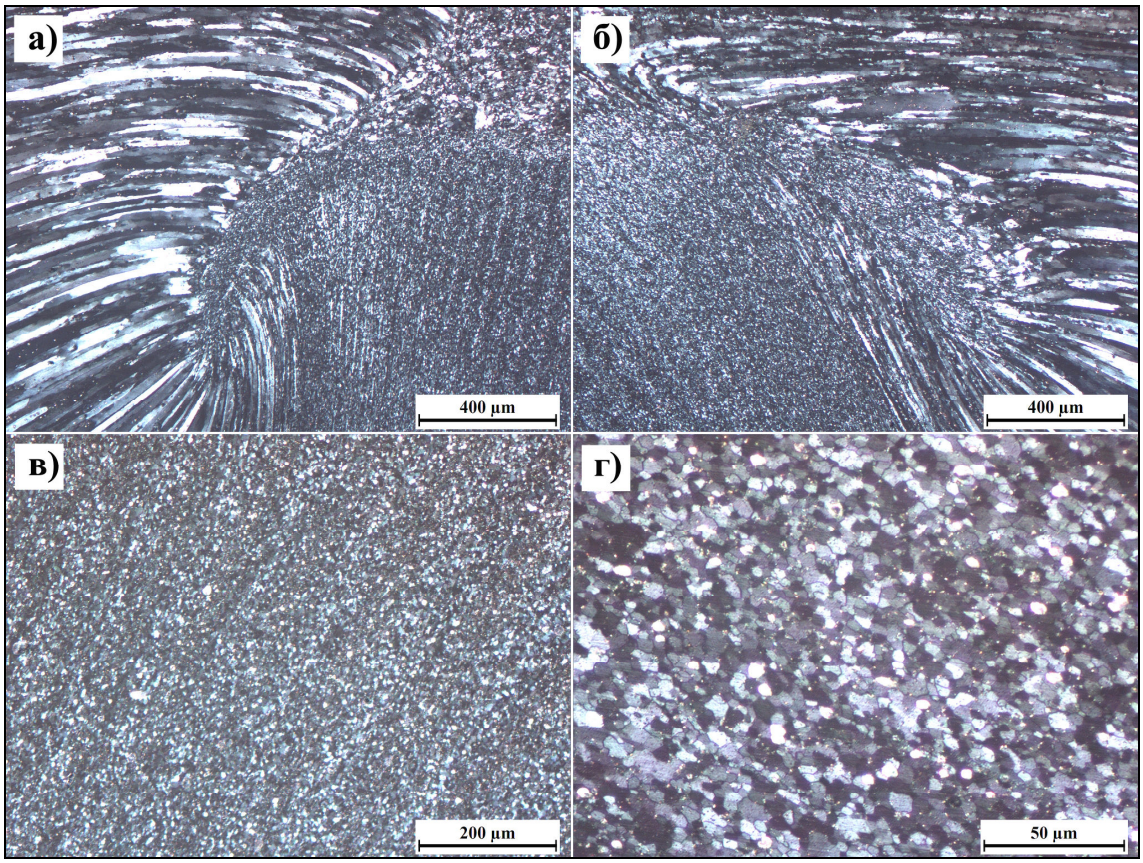
Микроструктура карактеристичних области завареног споја легуре 2024 приказана је сликама 4-42 и 4-43. Снимци са SEM-а (Слика 4-44) јасније показују значајне структурне разлике међу областима споја као и карактеристичну прстенасту структуру грумена.



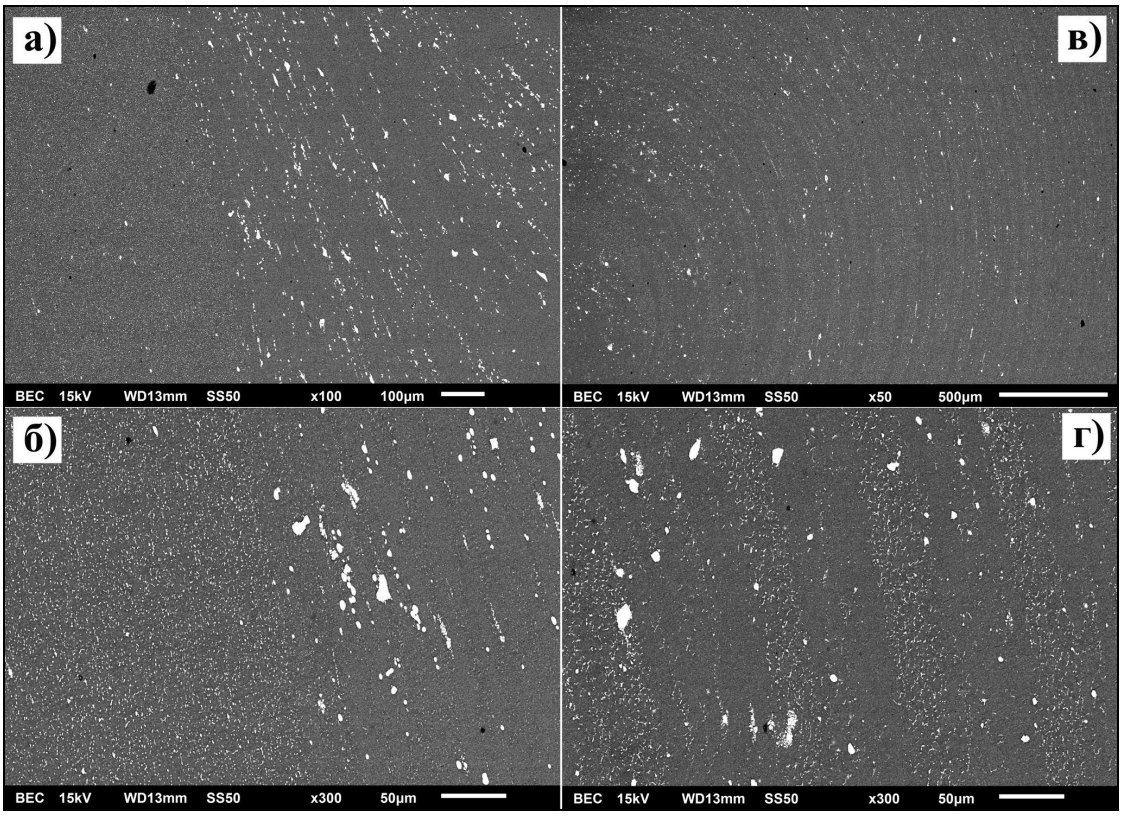
Слика 4-42**.** Микроструктура завареног споја легуре 2024 при односу V_{rot}/V_{zav} = 750/73 = 10,27: **а)** граница грумен-ЗТМУ на страни напредовања; **б)** граница грумен-ЗТМУ на повратној страни; **в)** и **г)** област грумена.

У основном материјалу, као последица претходно спроведеног процеса ваљања структура се састоји од издужених зрна. Са друге стране, структура самог споја је веома нехомогена. У различитим областима споја добијена су зрна различите величине и оријентације. Структура у грумену и делу ЗТМУ, непосредно уз грумен, је веома ситнозрна. Микроструктуру грумена карактеришу рекристалисана, веома ситна, једнакоосна зрна (Слике 4-42в, г и 4-43в, г). Јасно дефинисане границе зрна у грумену могу се идентификовати само при веома великим повећањима, а за потпуну карактеризацију мора се применити EBSD

метода. Структуру ЗТМУ карактеришу веома деформисана, ка лицу споја закривљена и издужена зрна (Слике 4-42а, б и 4-43а, б). Структура у претпостављеној области ЗУТ-а је веома слична структури основног материјала, што отвара дискусију о присуству и положају области ЗУТ-а. Као последица течења материјала током заваривања и дејства трна алата, одиграва се лом примарних Al_2Cu честица. Овај процес је интензивнији у области грумена негу у ЗТМУ, услед чега су у грумену добијене финије (уситњеније) Al_2Cu честице него у ЗТМУ (Слика 4-44а и б). Није уочено да промена параметара заваривања има значајног и видљивог утицаја на микроструктуру ни једне од области завареног споја.



Слика 4-43. Микроструктура завареног споја легуре 2024 при односу V_{rot}/V_{zav} = 1180/116 = 10,17: **а)** граница грумен-ЗТМУ на страни напредовања; **б)** граница грумен-ЗТМУ на повратној страни; **в)** и **г)** област грумена.

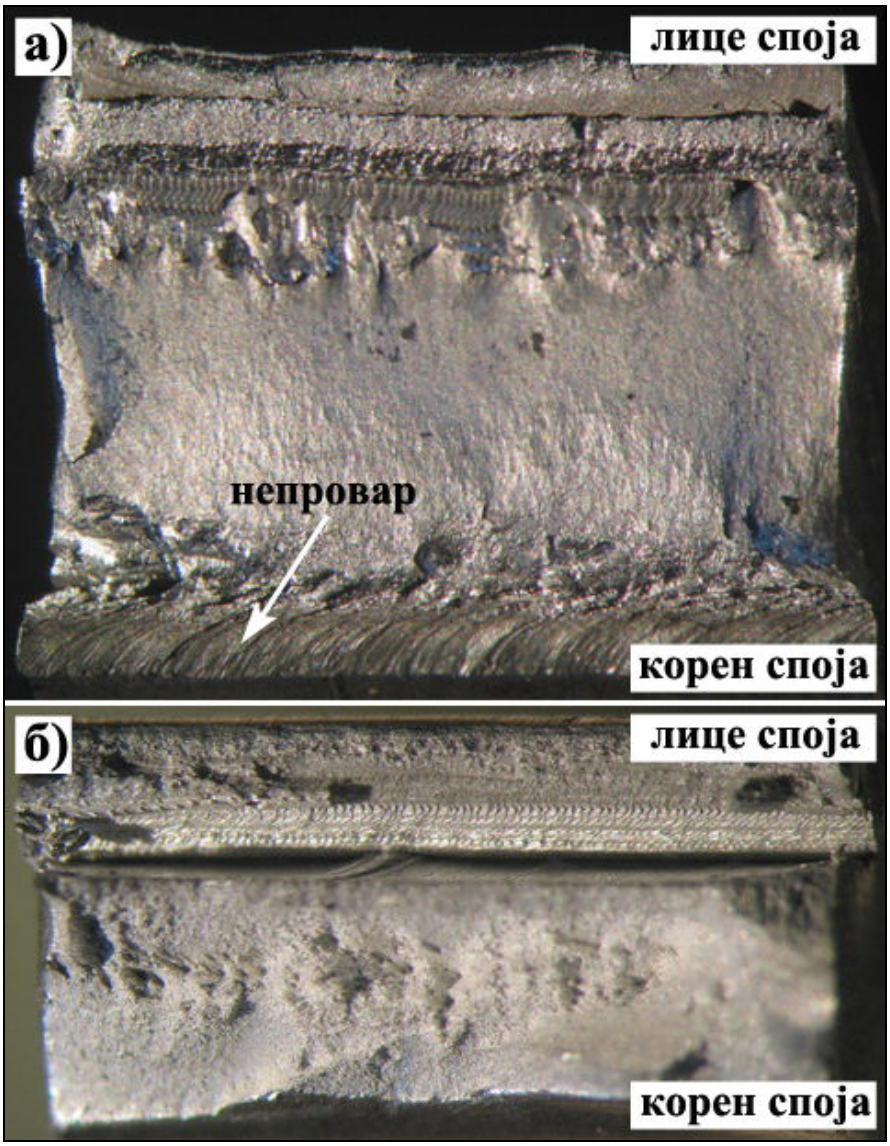


Слика 4-44. Структура споја – полирано стање узорка, SEM „backscatter“: **а)** и **б)** граница грумен-ЗТМУ на повратној страни; **в)** и **г)** прстенови у грумену.

4.7.3. Фрактографија

4.7.3.1. Фрактографска анализа спојева легуре 5052-H32

Фрактографска анализа преломних површина заварених спојева легуре 5052-H32 урађена је на епруветама за затезање. На преломљеним површинама затезних епрувета заварених спојева легуре 5052-H32 (Слика 4-45) јасно се уочавају три зоне: у средишњем делу је зона интезивног умешавања материјала тј. зона грумена, зона утицаја чела алата непосредно уз лице споја и зона на кореној страни споја која се просторно налази испод врха трна алата а у којој се јавља грешка типа непровара. У горњем делу преломне површине, ближе лицу споја, јасно се могу запазити трагови течења материјала око трна алата до кога долази услед истовремене ротације и кретања алата у правцу заваривања.



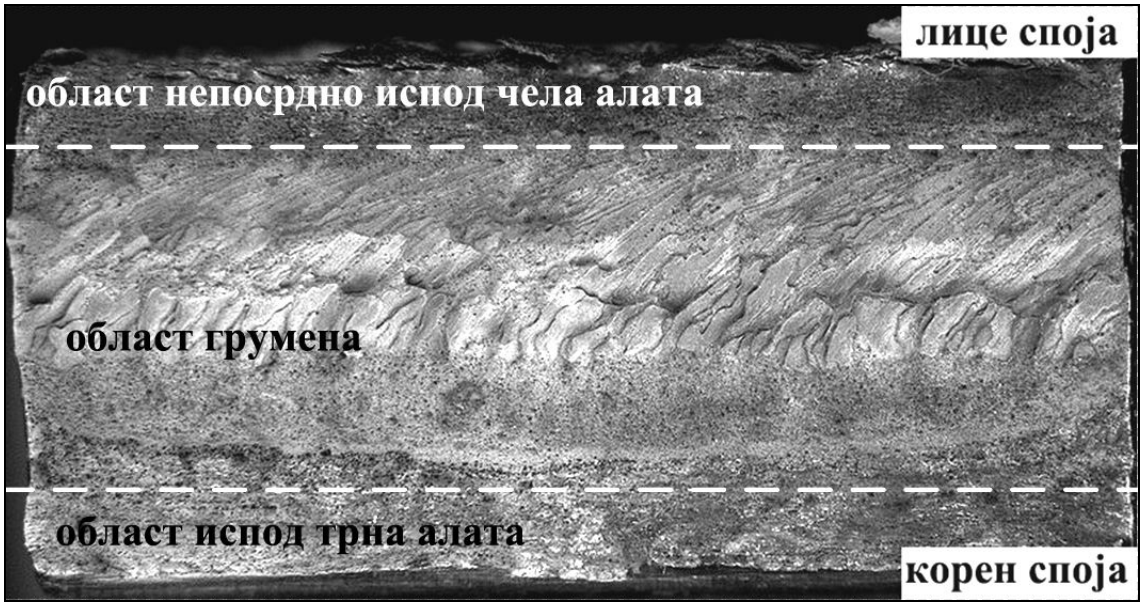
Слика 4-45. Преломне површине затезних епрувета спојева легуре 5052 заварених при V_{rot}/V_{zav} = 600/73 = 8,22: **а)** присутан непровар; **б)** без непровара.

4.7.3.2. Фрактографска анализа спојева легуре 2024-T351

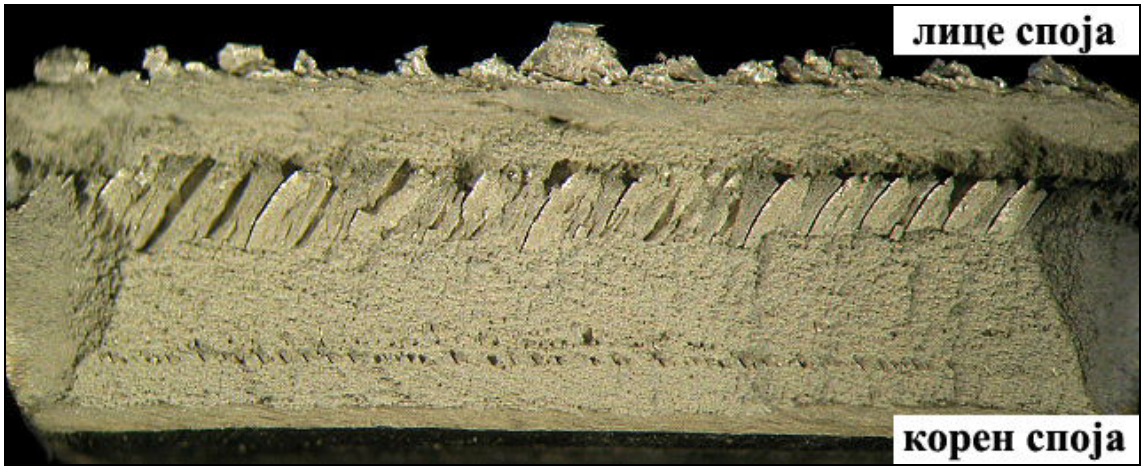
Фрактографска анализа преломних површина заварених спојева легуре 2024-T351 урађена је на епруветама за затезање, савијање и енергију удара. Фрактографском анализом преломљених површина уочено је постојање три типичне области прелома (Слике 4-46, 4-47 и 4-48), а које по својој локацији одговарају различитим условима који владају у њима током формирања завареног споја. Ове области се током заваривања формирају под утицајем чела и трна алата и зависе како од његове геометрије тако и од параметара заваривања. Разликујемо област интезивног умешавања материјала тј. област грумена, област доминантног утицаја

чела алата непосредно уз лице споја и област на кореној страни споја која се просторно налази испод врха трна алата а у којој се јавља грешка типа непровара.

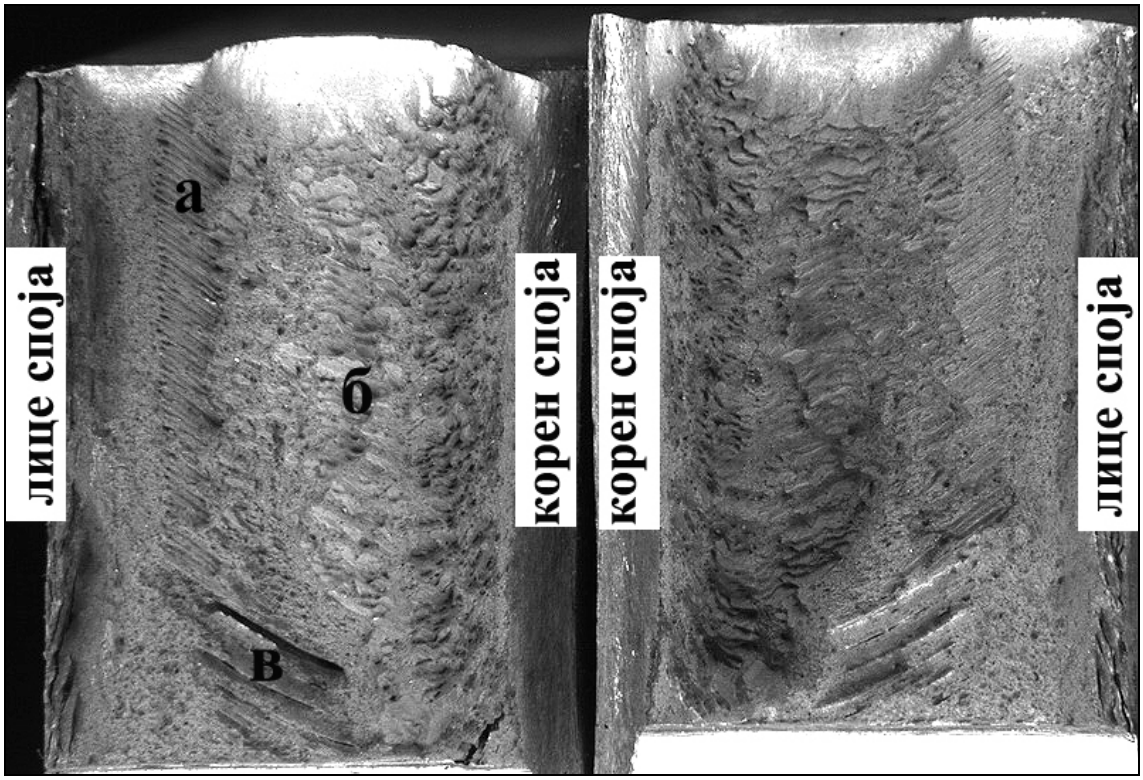
Трагови течења материјала око трна алата у области грумена су јасно уочљиви а на сликама 4-46 и 4-47 се манифестују у облику слојева тј. трака. Ове траке се на макроструктурном попречном пресеку узорка уочавају као „прстенови“.



Слика 4-46. Преломна површина затезне епрувете (V_{rot}/V_{zav} = 750/93 = 8,06).

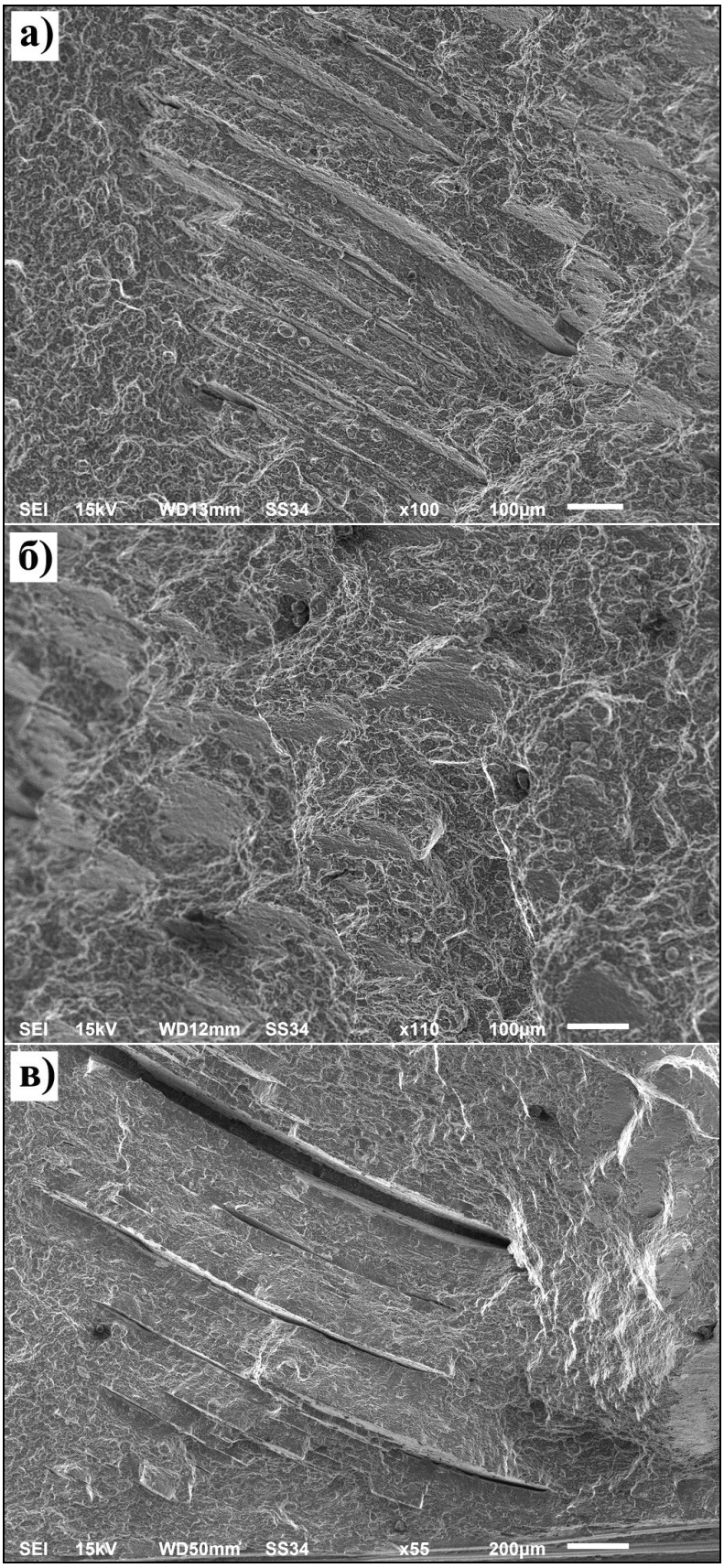


Слика 4-47. Преломна површина савојне епрувете (V_{rot}/V_{zav} = 750/150 = 5,00).

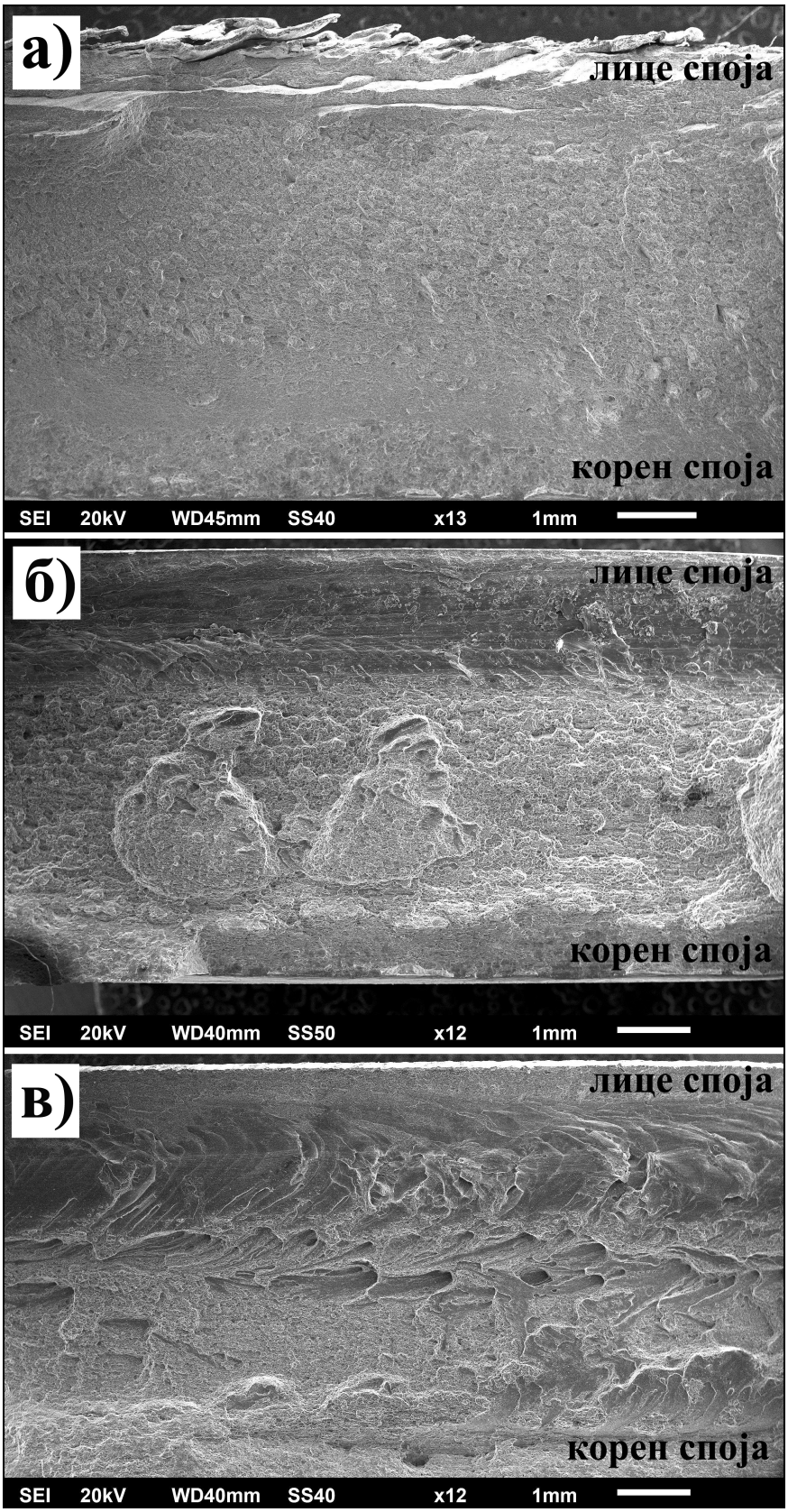


Слика 4-48. Преломна површина епрувете за енергију удара - две половине исте епрувете (V_{rot}/V_{zav} = 1180/116 = 10,17).

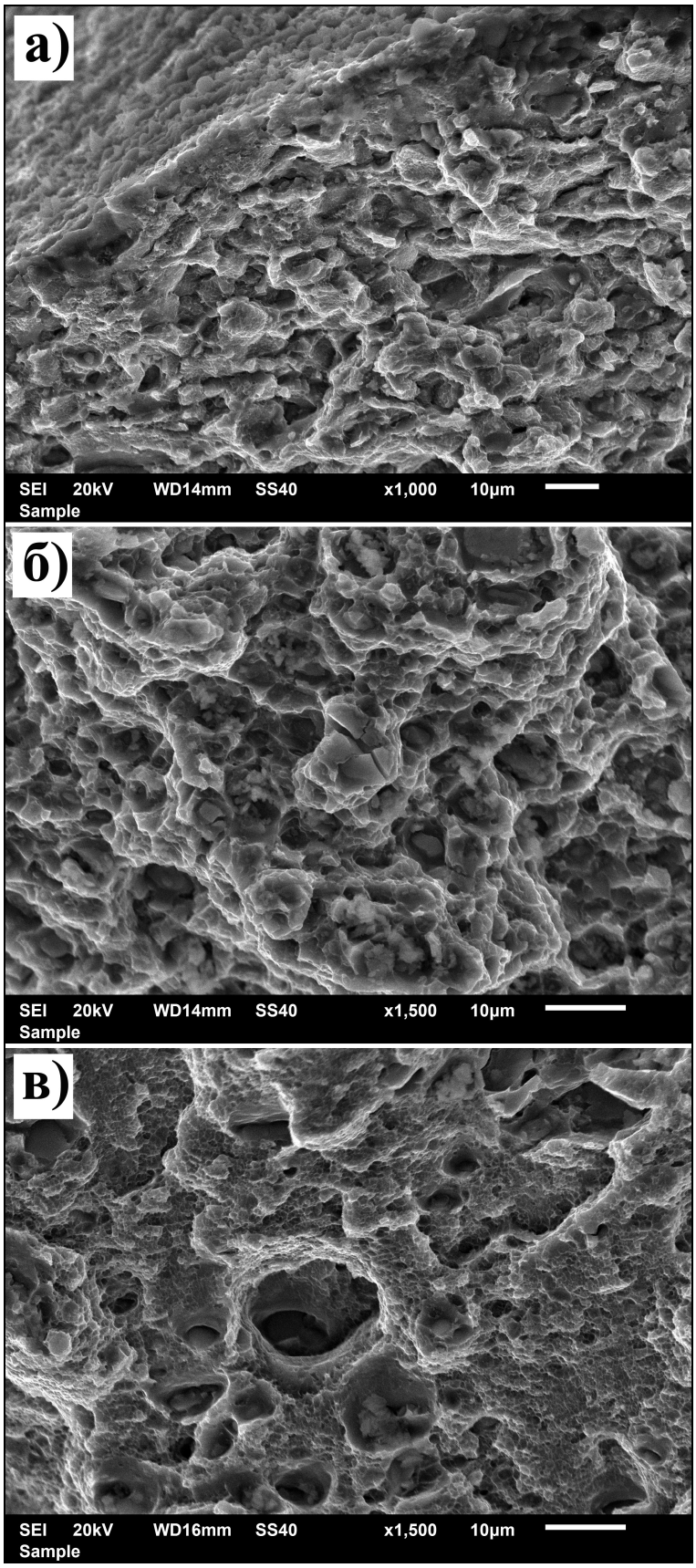
На сликама 4-49 до 4-54 приказане су SEM микрофотографије преломних површина затезних епрувета и епрувете за енергију удара као и одговарајући спектри анализираних честица добијени EDS анализом. Преломне површине јасно указују на изражену слојевитост у структури грумена (слика 4-49 и 4-53). Укључци присутни на споју између два слоја су преломљени (слика 4-53б). Механизам лома је по својој природи дуктилног карактера. Највећим делом површине прелома карактерише присуство бројних дуктилних еквиаксијалних, примарних и секундарних, јамица. На дну јамица запажа се присуство кртих честица како ситних тако и крупних. У области грумена долази до лома крупнијих честица (слика 4-51б, 4-52б и 4-53б). Место настанка прскотине је на крупним и кртим честицама. Према EDS анализи у питању су Al_2Cu честице са већим или мањим садржајем Fe.



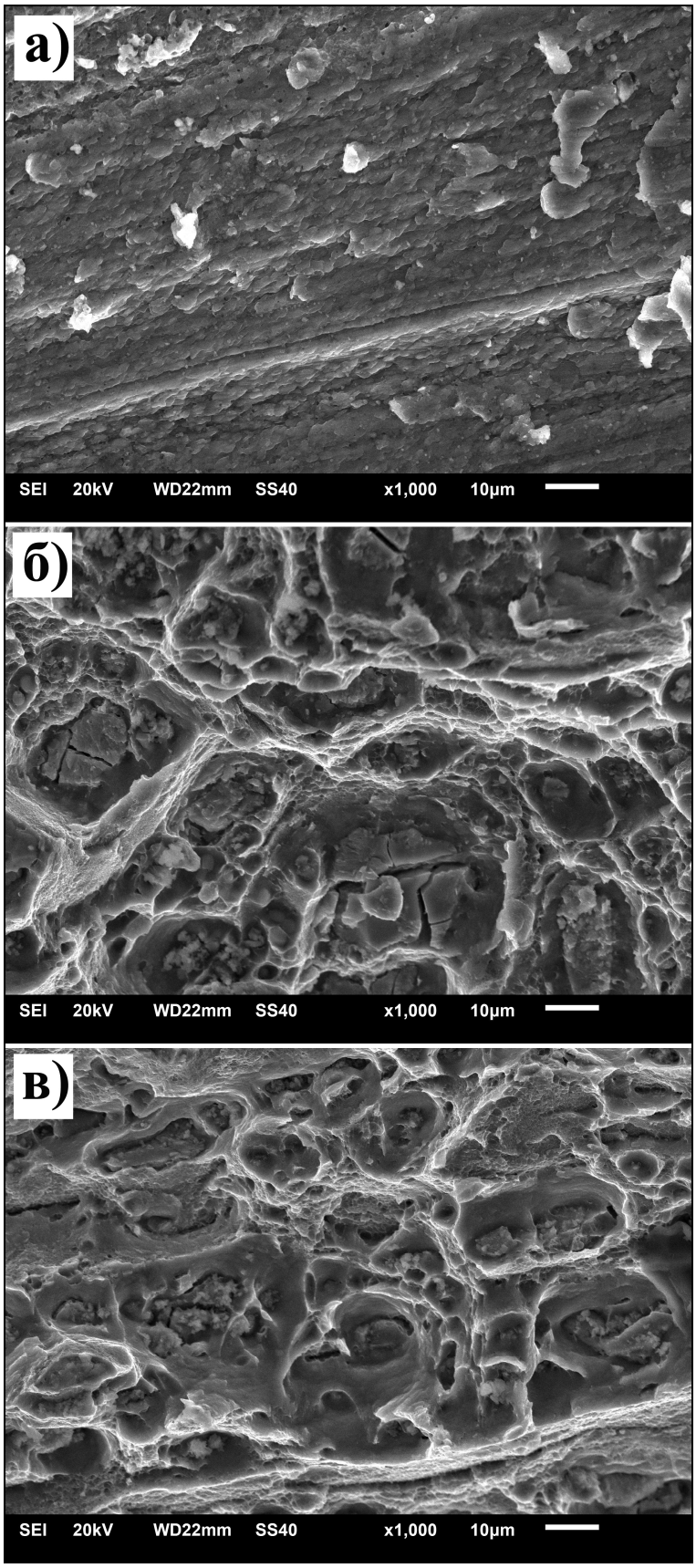
Слика 4-49. SEM микрофотографија. Макроскопски изглед подручја означених на слици 4-48.



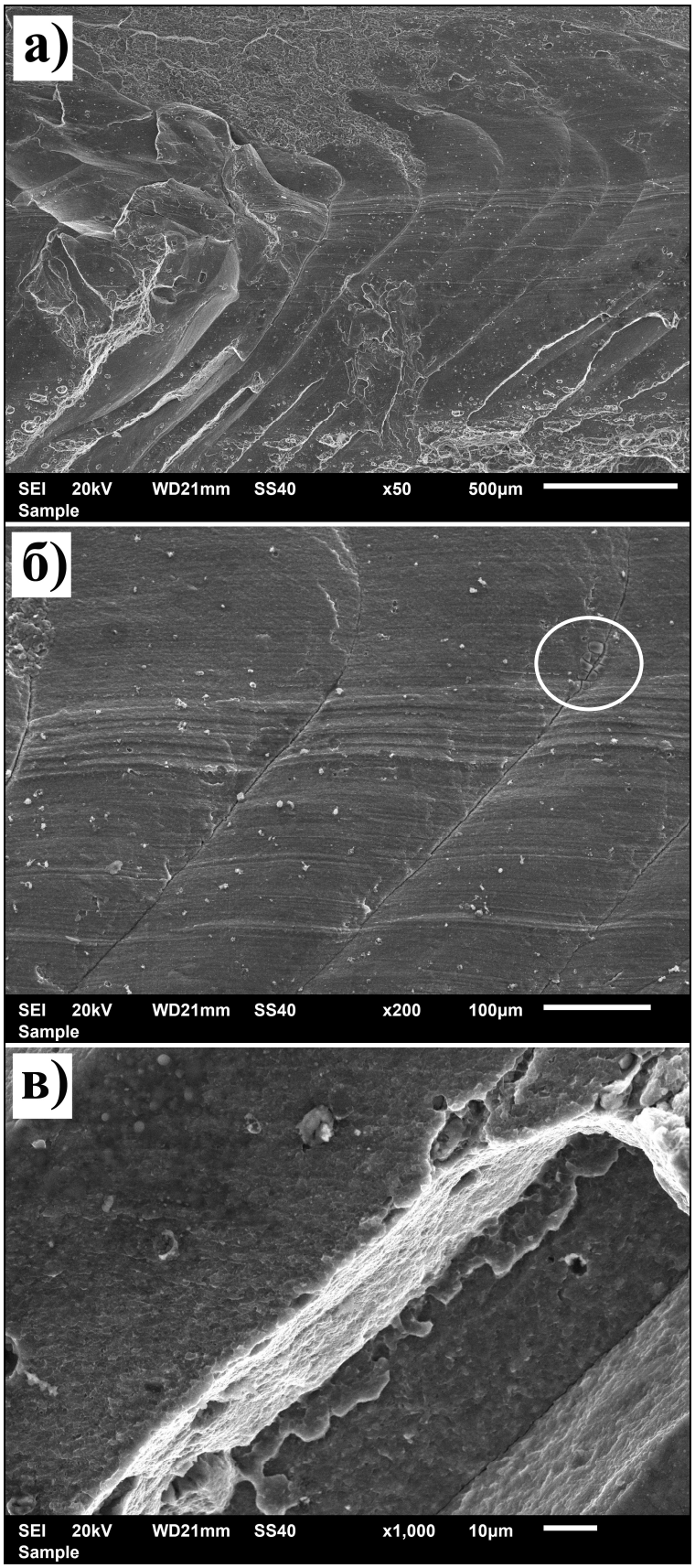
Слика 4-50. SEM микрофотографије. Макроскопски изглед преломних површина затезних епрувета: **а)** алат 310; V_{rot}/V_{zav} = 1180/46 = 25,65; **б)** алат 310; V_{rot}/V_{zav} = 750/150 = 5,00; **в)** алат 310-O; V_{rot}/V_{zav} = 750/150 = 5,00.



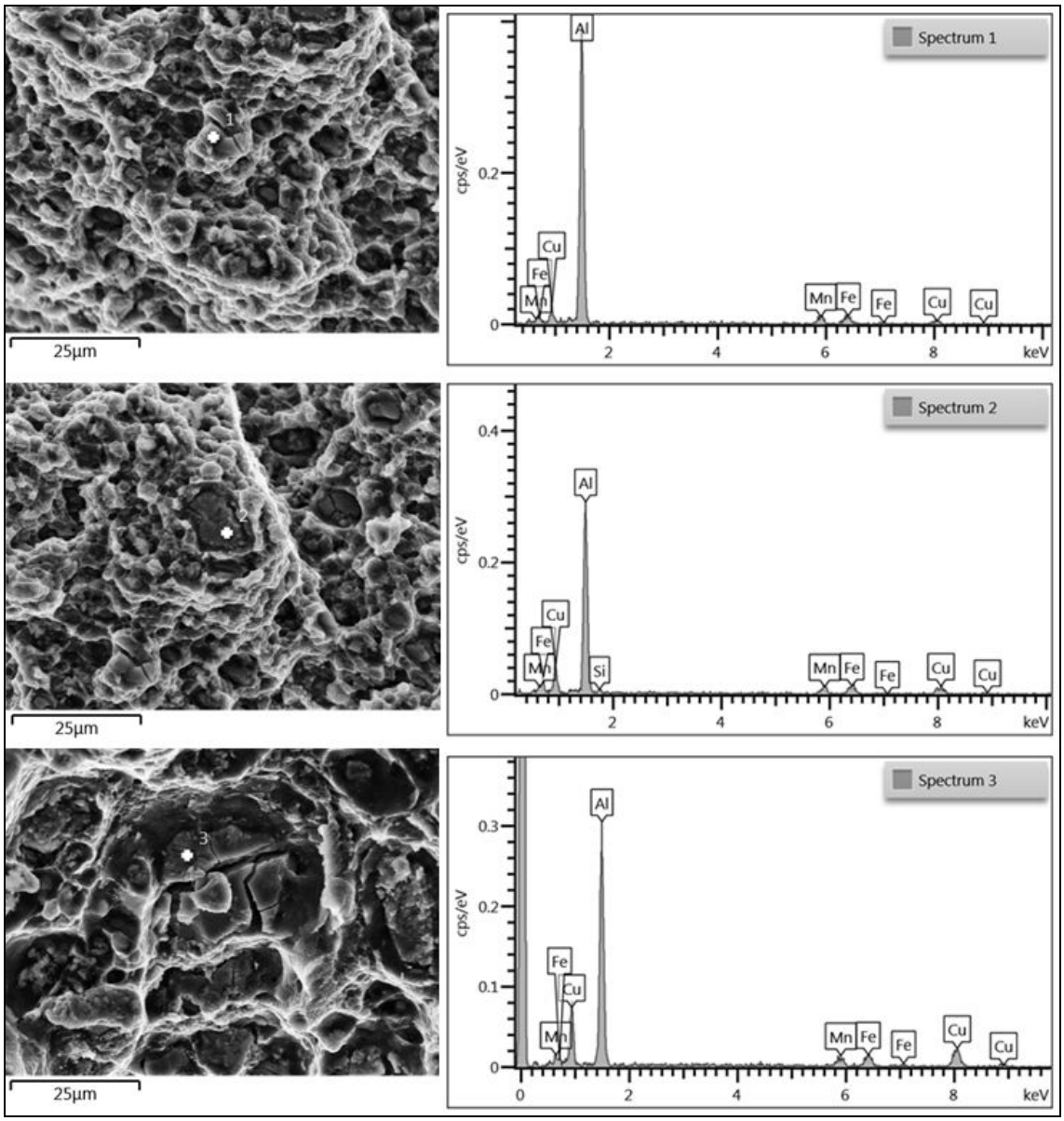
Слика 4-51. SEM микрофотографије преломне површине затезне епрувете (алат 310; V_{rot}/V_{zav} = 1180/46 = 25,65): **а)** зона лица споја; **б)** грумен; **в)** корена зона.



Слика 4-52. SEM микрофотографије преломне површине затезне епрувете (алат 310; V_{rot}/V_{zav} = 750/150 = 5,00): **а)** зона лица споја; **б)** грумен; **в)** корена зона.



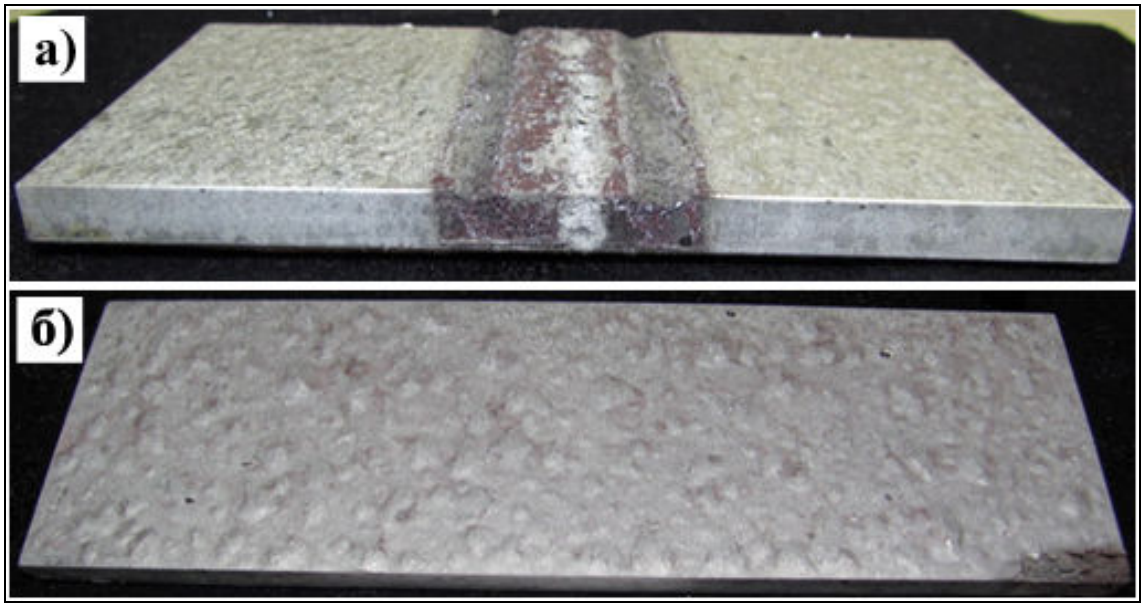
Слика 4-53. SEM микрофотографије преломне површине карактеристичне области са слике 4-50в (алат 310-О; V_{rot}/V_{zav} = 750/150 = 5,00).



Слика 4-54. EDS спектри честица присутних у структури грумена.

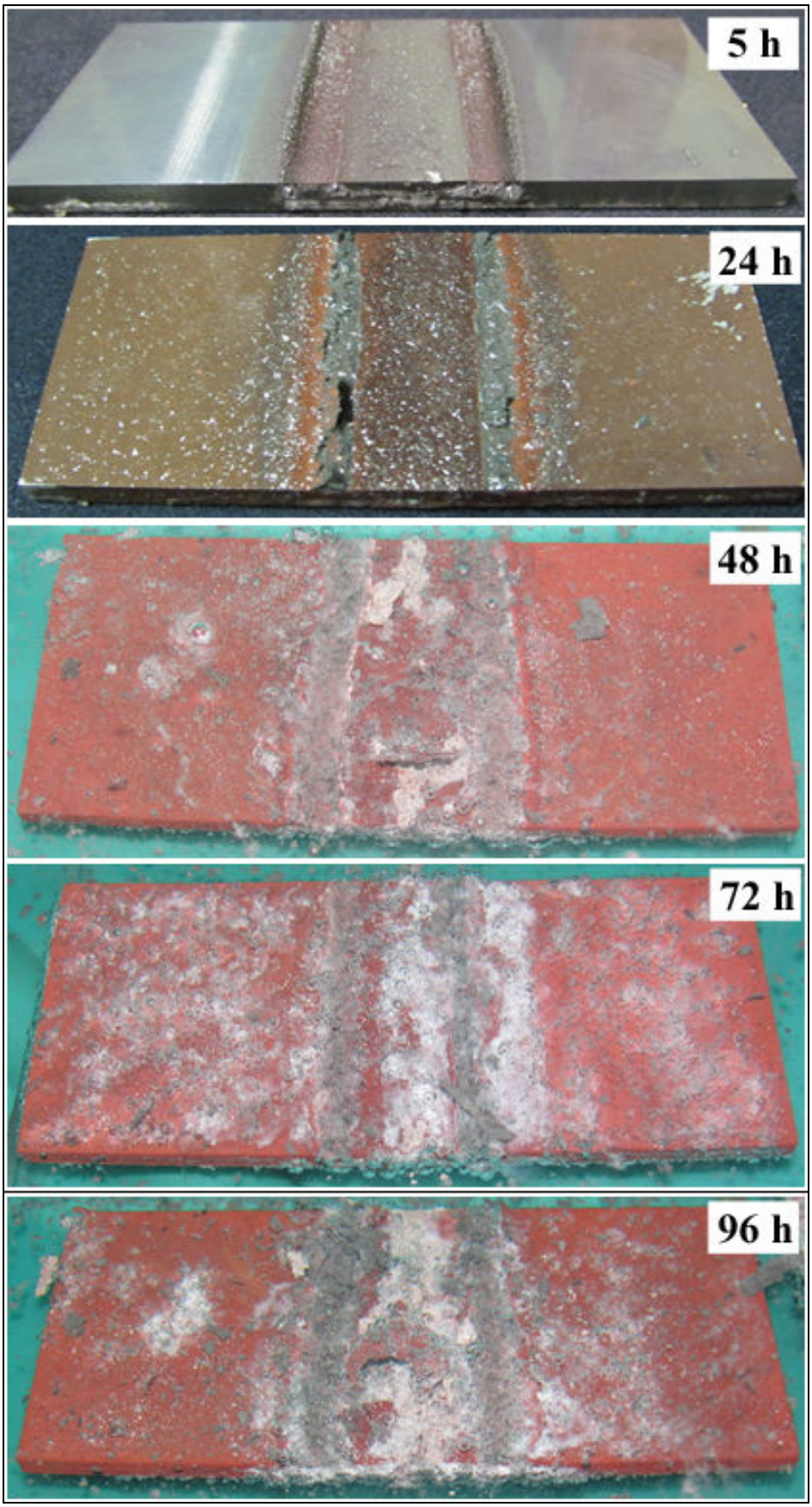
4.8. КОРОЗИОНА ПОСТОЈАНОСТ СПОЈЕВА ЛЕГУРЕ 2024-Т351

На слици 4-50 приказан је изглед завареног споја и ОМ након завршеног испитивања. Уочава се изражено дејство корозије у области непосредно ван ЗТМУ. Под утицајем корозионе средине дошло је до губитка материјала у наведеној области услед његове ексфолиације (раслојавања) и последичног одвајања и отпадања материјала. Процес излагања узорака дејству корозионе средине хронолошки је представљен сликом 4-51.



Слика 4-50. Заварени спој **(а)** и основни метал **(б)** након корозионог испитивања.

На основу визуелних испитивања установљено је да су корозионом утицају најподложније зоне непосредно ван области која је била изложена дејству чела ваљка алата. Положај ових зона одговара положају ЗУТ-а. У ЗТМУ је приметна значајна ексфолиација. Није утврђено присуство питинг корозије. Већ након 5 сати излагања узорака дејству корозионе средине, ефекат корозионог разарања постаје јасно видљив. Са протицањем временом корозијом оштећене зоне се повећавају и по ширину и по дубини узорка, а приметно је раслојавање и отпадање комада материјала. Макроскопски изглед попречних пресека спојева изложених дејству корозионе средине дат је у Прилогу Д.

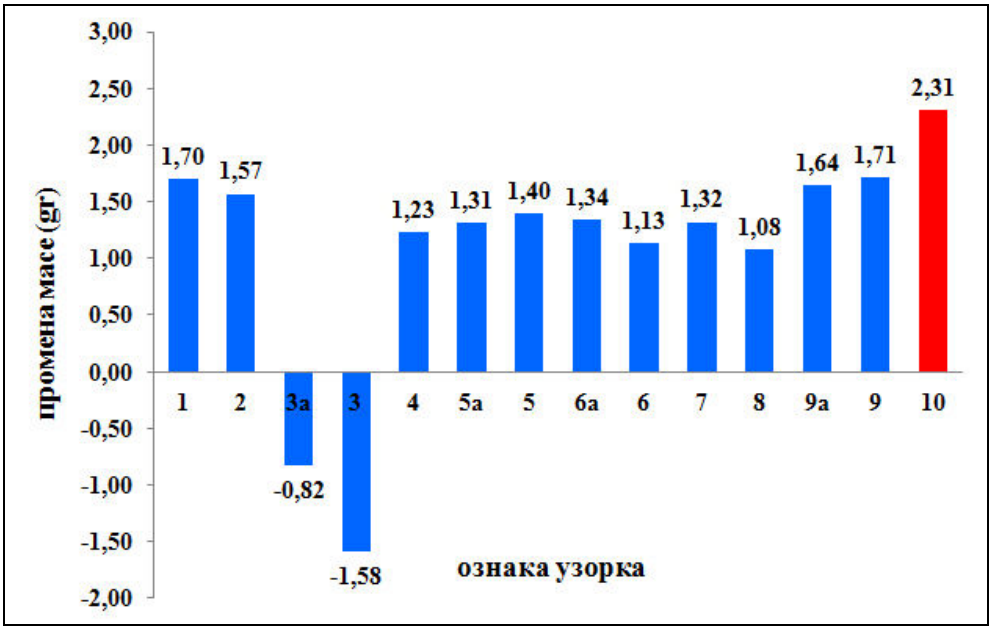


Слика 4-51. Излагање узорака корозионом дејству – хронолошки приказ.

Промена масе узорака након корозионог испитивања приказана је Табелом 4.9 и сликом 4-52. Запажа се да је само код узорака 3 и 3а, код којих је током заваривања унета највећа количина топлоте, дошло до смањења масе након излагања корозији. Код осталих узорака је дошло до благог повећања масе, у просеку за 1,40 грама.

Табела 4.9. Масе узорака пре и након корозионог испитивања.

ознака узорка	параметри заваривања	маса узорка (gr)		промена масе (gr)
		пре испитивања	након испитивања	
1	1180/150=7,87	119,43	121,13	1,70
2	1180/116=10,17	121,41	122,98	1,57
3а	1180/46=25,65	123,12	122,30	-0,82
3		119,47	117,89	-1,58
4	950/116=8,19	118,94	120,17	1,23
5а	950/93=10,21	122,25	123,56	1,31
5		121,03	122,43	1,40
6а	750/150=5,0	123,97	125,31	1,34
6		118,06	119,19	1,13
7	750/116=6,46	118,93	120,25	1,32
8	750/93=8,06	120,31	121,39	1,08
9а	750/73=10,27	123,60	125,24	1,64
9		120,36	122,07	1,71
10	ОМ	120,26	122,57	2,31



Слика 4-52. Промена масе узорака након корозионог испитивања (узорци са индексом „а“ нису машински обрађивани након заваривања).

5 ДИСКУСИЈА

Кључни параметри код поступка FSW, који обезбеђују успешно заваривање, су адекватно генерисање топлоте и способност алата да на најбољи начин реализује мешање загрејаног материјала. На оба фактора највећи утицај има геометријски облик радног дела алата, тј. трн, и чело алата.

Установљено је да конструкција алата са трном цилиндричног облика није задовољавајућа јер је извођење заваривање веома отежано а добијени спојеви су лошег квалитета са изразитим и константним присуством неприхватљивих грешака [10,64,74,75,76,77,81]. Са друге стране, код спојева заварених алатом са конусним трном добијени су прихватљиви резултати. Анализом постигнутих резултата одлучено је да се у даљем експерименталном раду за заваривање користе модели алата засновани на конструкцији алата са конусним профилом трна. Геометрија трна алата одређује који ће од два основна триболошка процеса који се одигравају при контакту алата и комада који се заварују, чисто клизање – адхезија и чисто „чупање“- деформација, бити доминантан. Поред тога, трном алата се остварује непрекидно мешање загрејаног материјала. У том погледу напогоднији је конусни облик тела трна на коме се налази одговарајући навој [10,66,69,80,81,83,84]. Конусним обликом трна постиже се мања сила у фази продирања алата у основни материјал, при чему је повољнији трн са мањим углом конуса. Радијус заобљења навоја практично не утиче на тврдоћу споја али применом алата са облим навојем добијају се мање вредности затезних карактеристика. Обли тип завојнице генерише мање топлоте и проузрокује слабији интензитет мешања

Резултати указују да је легура 2024-T351 веома осетљива на минималне модификације трна алата. Осетљивост је испитана коришћењем сета параметара који обезбеђују добар изглед површине, изостанак грешака и задовољавајуће механичке карактеристике. Модификација алата је обухватила искључиво промене у радијусу заобљења завојнице трна алата.

Утврђено је да је највећи утицај на макроструктуру (величина појединих карактеристичних зона) и на одговарајућу расподелу тврдоће. Позиције најниже

тврдоће су у ЗТМУ, веома близу зоне грумена. Ово понашање се може довести у везу са величином зрна у овој зони, тј. локалним повећањем величине зрна које доводи до смањења тврдоће [55,58-61,93,95,151]. Овај став се поткрепљује и локацијом прелома епрувета у тестовима једноосног затезања где у највећем броју случајева до лома долази управо у овој зони. Када је у питању ефикасност заварених спојева, она је боља у случају алата 310, и то и до 19%, у случају идентичних параметара заваривања. Може се констатовати да мале модификације у дизајну алата, нарочито у геометрији трна, имају великог утицаја на формирање завареног споја и механичке карактеристике.

Грешка типа тунела је недозвољена грешка која изазива појаву како смањења попречног пресека, тако и стварање концентратора напрезања. До појаве ове грешке на страни напредовања долази услед недовољног преноса/протока омекшалог материјала око трна алата са повратне ка страни напредовања, а јавља се услед неодговарајуће (превелике) брзине заваривања [73,129,131]. Тунел представља запреминску грешку те се стога може открити радиографским прегледом. Примењени параметри заваривања су нарочито неповољни када је тунел јасно уочљив визуелном контролом. Присуство тунела се зато користи као једна од једноставних метода елиминације лоше заварених спојева из даљих испитивања [152].

На пробама подвргнутим механичким испитивањима затезањем и савијањем, претходним визуелним и радиографским прегледом није откривено присуство запреминских грешака. Испитивања затезањем и савијањем су указала на постојање скривене грешке типа непровара на кореној страни шава. Грешка настаје услед недовољне пенетрације алата, односно неадекватног (повећаног) растојања између доње површине радног комада и врха трна алата [129,131,153]. Услед тога, омекшали материјал у зони доње површине радног комада се не умешава у довољној мери. Остварује се слабо али ипак довољно интимно дифузионо спајање материјала два радна комада па се овај тип грешке не може открити радиографским прегледом. Појава грешке типа непровара услед недовољне пенетрације алата има за последицу смањење затезне чврстоће метала шава и присуство прслина у грумену на шта указују и резултати добијени испитивањем затезањем и савијањем као и изглед преломних површина епрувета.

Установљено је да ова растојање између врха трна алата и доње ивице завариваног комада треба да износи око 0,5 mm. Грешка типа тунела се појављује у случајевима неадекватног течења материјала око трна са повратне стране на страну напредовања. Ово понашање се најчешће доводи у везу са великом брзином заваривања (транслације) [126,127,129]. Појава тунела се може елиминисати и/или смањењем брзине заваривања или модификацијом алата. Резултати указују да се заварени спој са захтеваним особинама добија при неком оптималном распону односа брзине ротације и брзине заваривања. Однос V_{rot}/V_{zav} указује да ли је за дате параметре заваривања могуће добити спој без присуства запреминске грешке типа тунела, али не и какве ће он механичке карактеристике поседовати. На основу овог односа може се само оријентационо претпоставити понашање споја. Иако се иста или приближно иста вредност односа V_{rot}/V_{zav} може остварити применом различитих параметара заваривања (нпр. 1180/116=10,17; 950/93=10,21; 750/73=10,27), добијени резултати дају основу да се претпостави да се услови одигравања процеса заваривања и формирања споја феноменолошки разликују. Поред односа V_{rot}/V_{zav}, велику улогу у добијању споја задовољавајућег квалитета има величина и константност притисне силе у вертикалном правцу [91,136,137] али она у овом раду није испитивана.

Макро испитивањима попречног пресека заварених спојева уочено је постојање области грумена, ЗТМУ и ЗУТ-а, њихов положај и облик. Јасно изражене линије течења материјала указују на карактер и смер тока материјала при одвијању процеса заваривања. Положај, простирање и израженост линија течења зависи од количине унете енергије, односно параметара заваривања [134]. Величина грумена се при истој брзини ротације алата повећава при смањењу брзине заваривања, услед веће количине унете енергије. Највећа ширина грумена добијена је при брзини ротације 1180 obr/min и брзини заваривања 46 mm/min а најмања ширина за брзину ротације 750 obr/min и брзину заваривања 150 mm/min, при чему однос V_{rot}/V_{zav} износи 25,65 односно 5,00, респективно. Разлика у величини грумена је последица разлике у брзини заваривања јер мања брзина заваривања доводи до веће количине унете топлоте а тиме расте температура заваривања [121,127,130]. У условима повећања температуре, расте и вредност Зенер – Холомоновог параметра чиме се олакшавају услови за појаву интензивне

динамичке рекристализације у току деформације или статичке рекристализације након што алат напусти зону заваривања и формира тзв „onion ring“ структуру у грумену [122,154]. Са друге стране може се сматрати да ЗТМУ није у толикој мери осетљива на промену параметара заваривања, јер у посматраним случајевима ипак није утврђена јасна међузависност величине ЗТМУ и параметара заваривања.

Микроструктурна испитивања су потврдила литературне наводе [108,128,155] да у области грумена и ЗТМУ, услед истовремене изложености и повишеној температури и механичком оптерећењу, долази до значајних промена у микроструктури и механичким особинама. Добијена рекристалисана ситнозрна структура је нарочито изражена у области грумена и рукавца [134,151,156]. Област ЗУТ-а је, због мале количине унете енергије, слабо изражена и не може се јасно одредити.

У зони грумена и ЗТМУ утврђено је присуство ситног зрна. У току веома интензивне пластичне деформације на повишеним температурама на величину зрна утичу процеси деформације и рекристализације [157,158]. Неки аутори сматрају да може доћи до динамичке рекристализације [61,78,94,159,160]. Веома фина равноосна зрна у зони грумена су више присутна у случајевима највећих уноса топлоте. Издужена зрна у ЗТМУ су последица значајно мање деформације и нижих температура, тако да процес статичке рекристализације није ефикасан. Са друге стране, у ЗУТ-у, пластична деформација изостаје, те су све промене последица искључиво термичког циклуса, тако да су главне нехомогености последица неравномерног пораста зрна. Како је у ЗТМУ и ЗУТ пластична деформација ограничена или изостаје, генерисана топлота се троши на повећање величине зрна и/или појаву огрубљавања талога. Такође, као што се види на Слици 4-41, унутар саме зоне грумена, јавља се разлика у величини зрна. Ситнија зрна су примећена ближе лицу споја у односу на центар или корен споја. Претпостављено је да је овакво понашање последица различитих постигнутих температура, услед присуства градијента температуре од чела алата према дну лима. Овакво понашање је потврђено и расподелом тврдоће, Слике 4-22 до 4-25.

У раду су испитане затезне особине, угао савијања, тврдоћа и енергија удара. Приликом испитивања затезнох карактеристиа завареног споје, са дијаграма је одређивана и граница течења. Како је у питању привидна вредност, тј. вредност која нема јасан физички значај, она неће бити коментарисана. Са друге стране, познавање ове вредности је од великог значаја за конструкторе, којима је неопходна квантитативна вредност за прорачун.

Добијене вредности затезне чврстоће завареног споја легуре 5052 су нешто ниже од очекиваних. Овакво понашање је приписано присуству скривене грешке услед недовољне пенетрације алата. Остварени резултати су задовољавајући јер је и поред присуства грешке постигнута висока ефикасност споја од 79%. У прилог овоме иде и податак да без присуства скривене грешке, при истим параметрима заваривања (V_{rot}/V_{zav}=600/73=8,22), ефикасност споја износи 97% [153].

Када је у питању легура 2024-T351, добијене вредности затезне чврстоће су веће у поређењу са вредностима заварених спојева добијених другим поступцима [161]. У зависности од изабраних параметара заваривања, затезна чврстоћа се креће у опсегу 252 до 398 MPa. Максимална ефикасност споја од 81.9% и 82.3% је добијена за однос брзина ротације и заваривања од 10.27 и 10.17, респективно. Како је затезна чврстоћа мера деформационог ојачавања, сама њена вредност се не може једнозначно довести у везу са оствареним издужењима. Све добијене вредности издужења су значајно мање од издужења основног метала и крећу се у опсегу 1.5 до 7.9%, док је највећа вредност од 8% добијена поново за однос 10.27. Претпостављено је да је ово понашање последица присуства свих нехомогености у структури (различита величина зрна и различити облици зрна). Смањење издужења се у неким случајевима тумачи као последица неусаглашености између унете топлоте и течења материјала.

Резултати одређивања угла савијања заварених спојева легуре 5052 око корена могу се сматрати незадовољавајућим јер се за добар резултат узима да је угао појаве прве прслине већи од 120^0 [147]. Добијене ниже вредности су највероватније последица присуства скривене грешке услед недовољне пенетрације алата, односно ефекта зареза који је на тај начин присутан . Ову чињеницу потврђују изглед и положај прслина насталих током савијања као и

место њиховог настанка. У прилог овом мишљењу иду и величине углова добијене при савијању око лица шава (113^0 и 112^0) као и податак да при настављању савијања до 180^0 ни у једном случају није дошло до прелома епрувете.

Резултати одређивања угла савијања заварених спојева легуре 2024 могу се сматрати задовољавајућим ако се има у виду да се ради о легури која је тешко заварљива класичним поступцима заваривања са топљењем материјала.

Расподела тврдоће кроз пресек споја легуре 5052 показује да је у целом завареном споју дошло до пада нивоа тврдоће у односу на основни материјал, што је последица процеса отпуштања до кога долази услед топлоте створене трењем током заваривања FSW поступком. Највећи пад тврдоће забележен је у ЗТМУ.

Расподелу тврдоће у FSW завареном споју легуре 2024, Слике 4-22 до 4-25 карактерише типичан несиметрични W облик, који се уобичајено јавља у случају таложно ојачаних алуминијумских легура [55,162]. Општа карактеристика је да су у свим зонама завареног споја тврдоће ниже у односу на основни метал. Највећу осетљивост на пад тврдоће показују ЗУТ и ЗТМУ. Претпостављено је да генерисана топлота у току заваривања у овим зонама доводи искључиво до повећања величине зрна и/или пораста крупних честица талога на рачун растварања ситних честица. Обе ове појаве доводе до пада тврдоће [78,96]. У зони грумена такође долази до пада тврдоће, али се сматра да је овај пад делимично ублажен појавом уситњавања структуре услед динамичке/статичке рекристализације [159,163]. Такође, као занимљивост, примећено је да је однос између најнижих тврдоћа (измерен у ЗТМУ) и тврдоће основног метала веома близак вредностима ефикасности завареног споја, Табела 4.2.

Расподела тврдоће је несиметрична и зависи од параметара заваривања. Уопштено, повећање брзине ротације за константну брзину заваривања има занемарљив утицај на просторну расподелу, али значајно повећање тврдоће самог грумена. Овакво понашање се може довести у везу са интензивнијом деформацијом око трна, који има за последицу интензивнију рекристализацију и рафинацију зрна [14,135]. Са друге стране, повећање брзине заваривања уз константну брзину ротације такође доводи до општег пораста тврдоће. Детаљне

мапе расподеле тврдоће су у одличној сагласности са расподелама нормалних напона које су предложили Reynolds и сарадници [22,164]. Услед несиметричне „W“ расподеле тврдоће, ниво тврдоће и позиција зона са најмањим вредностима тврдоће, подједнако зависе како од растојање од центра споја тако и од параметара заваривања. Затезне карактеристике и место прелома затезних епрувета су у веома доброј корелацији са расподелом тврдоће.

Енергије удара спојева заварених алатом 310-О генерално су веће у односу на спојеве заварене алатом 310. За спојеве заварене алатом 310 највећа вредност енергије удара добијена је за комбинацију V_{rot}/V_{zav} = 750/73 = 10,27 и износи 7,90 J. За спојеве заварене алатом 310-О највећа вредност енергије удара износи 8,35 J и добијена је за комбинацију параметара V_{rot}/V_{zav} = 750/116 = 6,46. Брзина заваривања нема једнозначан утицај на ударну жилавост споја. Смањење брзине заваривања повећава ударну жилавост споја при V_{rot}=750 obr/min док при V_{rot}=1180 obr/min са смањењем брзине заваривања долази до смањења вредности енергије удара. Код спојева заварених алатом 310-О оваква зависност није утврђена. Овакво понашање може се објаснити разликама у геометријама трна алата и улогом коју различита количина генерисане топлоте, при различитим параметрима заваривања, има на формирање споја. Чини се да је са аспекта жилавости, утицај геометрије трна алата доминантан [50,112]. Односно процес формирања слојевите структуре у грумену услед течења и деформације материјала има одлучујућу улогу. Удели енергија стварања прскотине у укупној енергији удара, за заварене спојеве су приближно истих вредности за оба коришћена алата и већи су од удела енергије стварања прскотине код ОМ, која износи 30%. Вредности енергије стварања прскотине код спојева крећу се у распону од 34% до 49% од укупне вредности енергије удара споја. Удели енергија ширења прскотине у укупној енергији удара, за заварене спојеве су приближно истих вредности за оба коришћена алата и мањи су од удела енергије стварања прскотине код ОМ, која износи 70%. Вредности енергије ширења прскотине спојева крећу се у распону од 51% до 66% од укупне вредности енергије удара споја.

Појава лома заварених спојева је коментарисана са аспекта механизма лома и позиције настанка прскотине. Позиција настанка лома је најчешће везана за ЗТМУ

у којој је долазило до највеће деградације особина, Табела 4.2 и 4.3. На Слици 4-50в је приказана преломљена површина, која је лоцирана у ЗТМУ. Јасно се могу идентификовати зоне контакта алата са материјалом. На слици се јасно могу идентификовати слојеви који одговарају различитим количинама материјала које алат наноси на повратну страну у току кретања. На Слици 4-53б је приказано и да на контактима слојева може доћи и до лома секундарних фаза.

Микромеханизам лома у овим легурама је дуктилни, тј. до лома долази у две фазе: (а) фаза настанка прскотине и (б) фаза раста прскотине. Утврђено је да прскотине настају механизмом лома честица крупних секундарних фаза (дефрагментација). Ове фазе могу бити различите по величини, а утврђено је да су у питању честице Al_2Cu са различитим садржајем Fe и/или Mn, слика 4-54. Утврђени састав честица је у сагласности са раније публикованим резултатима који се односе на хемијски састав честица у систему 2024. Присуство Fe је одлучујући разлог зашто се сматра да су у питању честице које се нису растворили у току растварајућег жарења [165].

Преломљене честице се налазе унутар јамица, чији облик их сврстава у дуктилни механизам. Поред примарних јамица, примећене су и јамице које су настале око ситних и финих честица – секундарне јамице. За њих се сматра да су настале механизмом декохезије, односно да не долази до лома ситних честица. За ове ситне честице се сматра да су у питању Al_2Cu.

Највећи утицај на појаву лома има заправо следећа фаза – раст прскотине. Сматра се да у почетку долази до коалесценције јамица, али и да се прскотина креће по одређеном правцу за који није јасна кристалографска природа. Напротив, примећено је да је раст прскотине повезан са присуством других макроскопских грешака, у светлу, формирања различитих слојева и њихове чврстоће. Може се сматрати да је ова фаза критично утиче на појаву лома, пошто се једном настала прскотина практично не може зауставити. У неким случајевима се сматра да се место настанка прскотине може повезати са границом између ЗТМУ и грумена, тј са зоном најниже тврдоће, пошто се сматра да је у тој зони дошло до огрубљавања Al_2Cu фазе и/или зрна. Такође је карактеристично да се ова зона може повезати и са положајем грешке типа тунела.

На узорцима код којих је током заваривања унета највећа количина топлоте, дошло је до смањења масе након излагања корозији. Код осталих узорака је дошло до благог повећања масе, у просеку за 1,40 грама. Корозионом утицају најподложније су зоне непосредно ван области која је непосредно била изложена дејству чела ваљка алата. Положај ових зона одговара положају ЗУТ-а. У ЗТМУ је приметна значајна ексфолиација док присуство питинг корозије није утврђено. Боља корозиона отпорност ЗТМУ/ЗУТ-а и грумена код легура серије 2ххх је регистрована и раније. Уситњавање талога у грумену и њихово огрубљавање у ЗТМУ/ЗУТ су по свој прилици фактори који највише доприносе побољшању корозионе отпорности ова две зоне. У зависности од брзине ротације дефинисана је област споја најподложнија корозионом нападу. При малим брзинама најугроженија је зона грумена док је при већим брзинама корозионом нападу најподложнија област ЗУТ-а. Односно може се резоновати да се са повећањем брзине ротације повећава и корозиона отпорност споја. Утицај брзине заваривања није регистрован. [59,162,166]

6. ЗАКЉУЧАК

Циљ истраживања у оквиру дисертације био је да се анализира утицај геометрије алата и параметара заваривања на механичке, структурне и корозионе карактеристике спојева алуминијумских легура 5052-H32 и 2024-T351 добијених применом FSW технологије заваривања.

На основу стечених теоријских сазнања и прилагођавањем постојеће опреме захтевима FSW процеса, изведен је низ експерименталних проба заваривања чији је крајњи циљ био добијање квалитетног завареног споја без грешака и практично упознавање са основним законитостима и захтевима поступка заваривања трењем алатом.

Експериментисано је са различитим параметрима заваривања да би се оценио утицај унете енергије на понашање материјала и квалитет завареног споја. Поновљивост процеса обезбеђена је применом истог алата и истих параметара заваривања.

Параметри заваривања, брзина ротације алата (V_{rot}) и брзина заваривања (V_{zav}), варирани су у широком опсегу од 450 до 1500 obr/min односно од 23 до 380 mm/min, респективно, при чему је однос брзине ротације и брзине заваривања (V_{rot}/V_{zav}) износио од 3,16 до 51,30. Угао нагиба алата износио је 1^0.

Резултати истраживања представљају хронолошки ток процеса упознавања и освајања савременог поступка заваривања трењем алатом у нашим условима. У том циљу успешно су моделовани и израђени одговарајући алати за заваривање и извршено заваривање алуминијумских легура из два различита система легирања, AA5052 и AA2024.

Освојена је геометрија алата и технологија заваривања трењем алатом алуминијумских плоча дебљина 7 и 6 mm од легура 5052-H32 и 2024-T351, респективно, а дефинисани су технолошки параметари заваривања. Издваја се успешно заваривање алуминијумске легуре 2024-T351 која са становишта заварљивости спада у групу тешко заварљивих, односно незаварљивих, алуминијумских легура.

Челици Č.1531 и Č.4830 су неодговарајући за израду FSW алата за заваривање алуминијумске легуре 2024-T351. Код алата израђених од ових челика, без обзира на геометријске карактеристике трна и чела ваљка, при оштријим режимима заваривања долазио до лома трна алата.

Алат израђен од алатног челика Č.5742 (56NiCrMoV7) има одличну постојаност у процесу заваривања трењем мешањем, тј. одличну отпорност на хабање и не долази до лома трна при оштријим параметрима заваривања алуминијумске легуре 2024-T351.

Најбољи резултати добијени су код спојева заварених алатом 310. Нешто слабији резултати постигнути су применом алата 310-O, код кога је изведен обли тип завојнице, док су остале геометријске карактеристике исте као и код алата 310. Ово се објашњава утицајем геометрије трна алата на количину генерисане топлоте, интензитета мешања и ток материјала током заваривања. Обли тип завојнице генерише мање топлоте и проузрокује слабији интензитет мешања.

Сагледан је утицај параметара заваривања, пре свега брзине ротације и брзине заваривања, на могућност добијања квалитетног споја и одређен њихов оптимални однос V_{rot}/V_{zav}. Однос V_{rot}/V_{zav} указује да ли је за дате параметре заваривања могуће добити спој без присуства запреминске грешке типа тунела, али не и какве ће он механичке карактеристике поседовати. На основу овог односа може се само оријентационо претпоставити понашање споја. Иако се иста или приближно иста вредност односа V_{rot}/V_{zav} може остварити применом различитих параметара заваривања (нпр. 1180/116=10,17; 950/93=10,21; 750/73=10,27), добијени резултати дају основу да се претпостави да се услови одигравања процеса заваривања и формирања споја феноменолошки разликују. Поред односа V_{rot}/V_{zav}, велику улогу у добијању споја задовољавајућег квалитета има величина и константност притисне силе у вертикалном правцу.

Повећање брзине ротације алата (V_{rot}) има позитиван утицај на механичке карактеристике завареног споја. Смањење брзине заваривања проузрокује деградацију изгледа површине споја услед прегоревања материјала. Смањење брзине заваривања има позитивног ефекта на повећање величине угла савијања при коме долази до појаве прслине.

Резултати одређивања енергије удара указују да смањење брзине заваривања позитивно утиче на повећње жилавост споја. Остварене вредности у енергије удара заварених спојева у нивоу од 90% од енергије удара ОМ су изразито задовољавајуће. Енергије стварања прслине на нивоу од 34 до 43% укупне енергије удара су веће од енергије стварања прслине ОМ, која износи 30%. Са друге стране енергије ширења прслине на нивоу од 57 до 66% укупне енергије удара су мање од енергије ширења прслине ОМ која износи 70%.

Вредности затезне чврстоће завареног споја су на веома задовољавајућем нивоу јер је при различитим параметрима заваривања остварена висока ефикасност споја од преко 80%.

Испитивања затезањем су показала да је најкритичније место за настанак прелома, граница грумен – ЗТМУ на страни напредовања, јер се преко 2/3 епрувета ту преломило.

Заварени спојеви легуре 5052-Н32 савијани су до угла од 180^0 при чему ни у једном случају није дошло до прелома епрувете. Резултати одређивања угла савијања заварених спојева легуре 2024-Т351 могу се сматрати задовољавајућим ако се има у виду да се ради о легури која је тешко заварљива класичним поступцима заваривања са топљењем материјала.

Расподела тврдоће кроз пресек споја показује да је у целом завареном споју дошло до пада нивоа тврдоће у односу на основни материјал. Највећи пад тврдоће забележен је у ЗТМУ. Област грумена је део завареног споја са највећом тврдоћом. До пораста тврдоће у грумену долази услед смањења величине зрна и/или издвајања секундарне фазе а последица су изражене рекристализације у овој области споја. Смањење V_{zav} повећава ниво тврдоће у грумену.Резултати испитивања тврдоће су у сагласности са резултатима затезних карактеристика.

Мапирањем области споја на основу расподеле тврдоће, одређени су положај и простирање најслабијих критичних области у којима долази до лома а у сагласности су са резултатима механичких и металографских испитивања. Региони са најнижом тврдоћом лоцирани су у ЗТМУ, тачније у делу ЗТМУ непосредно уз линију додира ЗТМУ – грумен.

Макро испитивањима попречног пресека заварених спојева уочено је постојање области грумена и ЗТМУ, њихов положај и облик. Јасно изражене линије течења материјала указују на карактер и смер тока материјала при одвијању процеса заваривања и у сагласности су са литературним подацима. Положај, простирање и израженост линија течења зависи од количине унете енергије, односно параметара заваривања. Величина грумена се при истој брзини ротације алата повећава при смањењу брзине заваривања, услед веће количине унете енергије.

У области грумена и ЗТМУ, услед истовремене изложености и повишеној температури и механичком оптерећењу, долази до значајних промена у микроструктури и механичким особинама. Добијена рекристализована ситнозрна структура је нарочито изражена у области грумена и рукавца. Структуру ЗТМУ карактеришу веома деформисана, ка лицу споја закривљена и издужена зрна. Област ЗУТ-а је, због мале количине унете енергије, слабо изражена и не може се јасно одредити што отвара места дискусији о присуству и положају ЗУТ-а.

Постоје три типичне области прелома, које по локацији одговарају различитим условима који владају у овим зонама током формирања завареног споја. Разликујемо област интезивног умешавања материјала тј. област грумена, област доминантног утицаја чела алата непосредно уз лице споја и област на кореној страни споја која се просторно налази испод врха трна алата а у којој се јавља грешка типа непровара.

Изглед преломних површина указује на изражену слојевитост у структури грумена. Површине прелома карактерише присуство бројних дуктилних еквиаксијалних, примарних и секундарних, јамица. У области грумена долази до лома крупнијих честица. Место настанка прскотине је на крупним и кртим честицама.

Корозионом утицају најподложније су зоне непосредно ван области која је била изложена дејству чела ваљка алата. Положај ових зона одговара положају ЗУТ-а. Није утврђено присуство питинг корозије, већ само ексфолиације (раслојавања). Губитак масе код узорка завареног при V_{rot}/V_{zav} = 1180/46 = 25,65 није разјашњен.

[1] H.B. Cary, Modern welding technology, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, USA, 1979.

[2] J.R. Kissell, R.L. Ferry, Aluminum structures – A guide to their specifications and design, Second edition, John Willey & Sons, Inc., New York, USA, 2002.

[3] G.E. Totten, D.S. MacKenzie, Handbook of aluminum, Vol. 1, Physical metallurgy and processes, Marcel Dekker, Inc., New York, 2003.

[4] B. Verelinden, A.M. Zahra, Materials Science Forum, Vol. 426-432, (2003), 423-428.

[5] I.J. Polmear, Light alloys – From traditional alloys to nanocrystals, Fourth edition, Elsevier, 2006.

[6] А. Седмак, В. Шијачки, А. Милосављевић, В. Ђорђевић, М. Вукићевић, Машински материјали – 2 део, Машински факултет, Београд, 2000.

[7] SRPS C.T3.001, Техника заваривања метала – Дефиниције појмова и називи, ИСС, Београд, 1972.

[8] SRPS C.T3.012, Заваривање и лемљење метала – Листа поступака и означавање поступака заваривања на цртежима, ИСС, Београд, 1991.

[9] G. Mathers, The welding of aluminum and its alloys, Cambridge, England, (2003), 4-165.

[10] W.M. Thomas, C. J. Dawes, Development of Improved Tool Designs for Friction Stir Welding of Aluminum, Proceedings of the 1st International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, June 1999, distributed on CD.

[11] Facts about Aluminum welding, AGA Gas AB SKG–203, Sweden, Member of the Linde Gas Group, 1996, www.aga.se.

[12] Metals Handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM Metals Park, Ohio, 1997.

[13] М. Павловић, Љ. Радовић, Алуминијумске легуре повишене чврстоће за заварене конструкције, Заваривање и заварене конструкције, 3, (2001), 99-105.

[14] A.P. Reynolds, Friction Stir Welding of Aluminium Alloys, University of South Columbia, South Carolina, USA, 2003.

[15] http://www.twi.co.uk/j32k/getFile/fswapp.html, Friction Stir Welding – Applications.

[16] M.R. Johnsen, Friction Stir Welding Takes Off at Boeing, The Welding Journal, 78, (1999), 35-39.

[17] O.T. Midling, J.S. Kvale, O. Dahl, Industrialisation of the Friction Stir Welding Technology in Panels Production for the Maritime Sector, Proceedings of the 1st International Symposium on Fricion Stir Welding, Thousand Oaks, CA, June 1999, distributed on CD.

[18] C. Jones, G. Adams, Assembly of a Full-Scale External Tank Barrel Section Using Friction Stir Welding, Proceedings of the 1st International Symposium on Fricion Stir Welding, Thousand Oaks, CA, June 1999, distributed on CD.

[19] Anonymous, New Jet to be Built with Friction Stir Welding, The Welding Journal, 79, (2000), 7-16.

[20] Д. Вељић, Н. Радовић, А. Седмак, М. Перовић, Технологија заваривања алуминијумских легура поступком заваривања трењем алатом, Заваривање и заварене конструкције, 55, (2010), 13-20.

[21] Z. Feng, Friction Stir Welding and Processing – an overview, University of Michigan Ann Arbor, 15. April, 2005.

[22] A.P. Reynolds, W.D. Lockwood, T.U. Seidel, Processing Property Correlation in Friction Stir Welds, Aluminum Alloys: Their Physical and Mechanical Properties, Materials Science Forum, Vol. 331-3, (2000), 1719-1724.

[23] http://www.twi.co.uk/j32k/getFile/fswmat.html, Friction Stir Welding - Materials and thicknesses.

[24] B. London, M. Mahoney, B. Bingel, M. Calabrese, D. Waldron, Proceedings of the 3rd International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe, Japan, Sept 27-28, 2001.

[25] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P.Templesmith, C.J. Dawes: Friction Stir Butt Welding, Int.Patent App. PCT/GB92/02203 and GB Patent App. 9125978.8, Dec. 1991. U.S. Patent No. 5,460,317, Oct. 1995.

[26] K.E. Knipström, New welding method for aluminium, ESAB Svetsaren No 3, (1995), 5-6.

[27] N.N., Friction welding of aluminium, ESAB Svetsaren No 1, (1995), 30-31.

[28] An American National Standard, AWS D17.3/D17.3M:200X, American Welding Society, Specification for Friction Stir Welding of Aluminum Alloys for Aerospace Hardware.

[29] C. Dawes, W. Thomson, Friction stir joining of aluminium alloys, TWI Bulltin 6, (1995), 124-127.

[30] S. Stoltz, Friction stir welding - Ein neues Schweißverfahren für Alluminiumwerkstoffe, DVS Berichte, Band 200, 1-8.

[31] A New Aluminium Welding Process, www.frictionstirwelding.com

[32] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith, C.J. Dawes, Improvements relating to friction welding. European Patent Specification EP 0 615 480 B1. l2.espacenet.com/dips/viewer?PN=EP0615480.

[33] O.T. Midling, E.J. Morley, A. Sandvik, Friction stir welding, European Patent Specification EP 0 752 926 B1. l2.espacenet.com/dips/viewer?PN=EP0752926.

[34] Д. Стаменковић, М. Ђурђановић, Д. Митић, Заваривање поступком FSW, Заваривање и заварене констукције, 2, (2006), 59-66.

[35] A. Strombeck, F. Torster, J. dos Santos, M. Kocak, Mikrostrukturelle und mechanische Eingeschaften von reibrührgeschweißten Verbindungen in Al-Legierungen, GKSS / TWI Workschop, 3.Mai. (1999), 54-63.

[36] М.Б. Ђурђановић, Примена топлоте генерисана трењем, рукопис предавања, Машински факултет, Ниш, 2002.

[37] Д. Вељић, Технологија заваривања алуминијумских легура трењем помоћу алата, Магистарски рад, Машински факултет, Београд, 2006.

[38] P. Konkol, K. Colligan, Friction Stir Welding of Structural Materials for Naval Combatants.

[39] W.M. Thomas, Friction Stir Welding of Ferrous Materials, A Feasibility Study, 1st ISFSW, Rockwell Science Center, Thousand Oaks, USA, 14 – 19 June, 1999.

[40] М. Перовић, Д. Вељић, М. Ракин, Н. Радовић, Ј. Дакић, А. Живковић, Evaluation of characteristics FSW joints of forged panels made of high strength aluminum alloys Al-Zn-Mg-Cu in a T652 temper, 1st International Scientific Conference on Engineering,

Manufacturing and Advanced Technologies, MAT 2010, Mostar, 18-20 November, 2010.

[41] M.W. McLane, P.W. Carter, Free-Form Friction stir welding, Proceedings of 4th International Symposium on FSW, Park City, Utah, 14-16 May, 2003.

[42] W.M. Thomas, P.L. Threadgill, E.D. Nicholas, Feasibility of Friction Stir Welding of Steel, Science and Techology of Welding and Joining, 4(6), (1999), 365 – 372.

[43] S. Dike, V. Prakash, J.J. Lewendowski, High Strain Rate/Temperature Experiment Relevant to Friction Stir Welding of HSLA 65, 2009.

[44] M. Posada, J.P. Nguyen, D.R. Forrest, Friction Stir Welding Advances Joining Technology, Defense Technical Information Center, Amptiac, Vol. 7, No. 3, 2003.

[45] T.J. Lienert, W.L. Stellwag, B.B. Grimmett, R.W. Warke, Friction Stir Welding Studies on Mild Steel, Welding Journal 82(1), (2003), 1–9.

[46] R. Nandan, T. DebRoy, H. Bhadeshia, Recent Advances in Friction Stir Welding – Process, Weldment, Structure and Properties, Progress in Material Science, Vol. 53, (2008), 980–1023.

[47] T. Hashimoto, S. Jyogan, K. Nakata, FSW Joints of High Strength Aluminium Alloy, 1st ISFSW, Rockwell Science Center, Thousand Oaks, USA, 14 – 19 June, 1999.

[48] H. Hori, S. Makita, H. Hinto, Friction Stir Welding of Rolling Stock for Subway, 1st ISFSW, Rockwell Science Center, Thousand Oaks, USA, 14 – 19 June, 1999.

[49] L. Cederqvist, A.P. Reynolds, Properties of Friction Stir Welded Aluminium Lap Joints, 2nd ISFSW, Gothenburg, Sweden, 26 – 28 June, 2000.

[50] L. Magnusson, L. Kallman, Mechanical Properties of Friction Stir Welds in Thin Sheet of Aluminium 2024, 6013 and 7475, 2nd ISFSW, Gothenburg, Sweden, 26 – 28 June, 2000.

[51] G. Biallas, R. Braun, C. Dalle Donne, G. Staniek, W.A. Kaysser, Mechanical properties and corrosion behavior of Friction Stir Welded 2024-T3, 1st ISFSW, Rockwell Science Center, Thousand Oaks, USA, 14 – 19 June, 1999.

[52] J. Kristensen, C. Dalle Donne, T. Ghidini, J. Mononen, A. Norman, A. Pietras, M. Russell, S. Slater, Properties of Friction Stir Welded joints in the aluminium alloys of 2024, 5083, 6082/6060 and 7075, 5th ISFSW, Metz, France, Sept 14-16, TWI.

[53] S.W Kallee, E.D. Nicholas, W.M Thomas, Friction Stir Welding: Invention, Innovations and Industrialization, TWI Ltd, Grant Park, Great Abington, Cambridge CB1 6AL, United Kingdom http://www.frictionstirweldig.co.uk/, http://www.eurostir.co.uk/

[54] М. Мијајловић, А. Живковић, Д. Милчић, И. Радисављевић, Утицај параметара FSW поступка заваривања на квалитет завареног споја алуминијумске легуре 5052, Саветовање са међународним учешће, Заваривање 2010, Тара, 2-4 јун, 2010.

[55] R.S. Mishra, Z.Y. Ma, Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering R, 50 (2005), 1–78.

[56] http://www.twi.co.uk/ Microstructure Classification of Friction Stir Welds

[57] A. Ali, M.W. Brown, C.A. Rodopoulos, S. Gardine, Characterization of 2024-T351 Friction Stir Welding Joints, Journal of Failure Analysis and Prevention, 4, (2006), 83-96.

[58] B. Yang, J. Yan, M.A. Sutton, A.P. Reynolds, Banded microstructure in AA2024-T351 and AA2524-T351 aluminum friction stir welds Part I. Metallurgical studies, Materials Science and Engineering A, 364, (2004), 55–65.

[59] P.B. Srinivasan, K.S. Arora, W. Dietzel, S. Pandey, M.K. Schaper, Characterisation of microstructure, mechanical properties and corrosion behaviour of an AA2219 friction stir weldment, Journal of Alloys and Compounds, 492, (2010), 631–637.

[60] M. Strangwood, J.E. Berry, D.P. Cleugh, A.J. Leonard, P.H. Threadgill, Characterization of the thermo-mechanical effects on microstructural development in friction stir welded age hardening aluminium alloys, Proceedings of the 1st International Symposium on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, CA, June 1999, distributed on CD.

[61] P. Cavaliere, R. Nobile, F.W. Panella, A. Squillace, Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46, (2006), 588–594.

[62] H.N.B. Schmidt, T.L. Dickerson, J.H. Hattel, Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3, Acta Materialia, 54, (2006), 1199–1209.

[63] A.A.M. da Silva, E. Arruti, G. Janeiro, E. Aldanondo, P. Alvarez, A. Echeverria, Material flow and mechanical behaviour of dissimilar AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminium alloys friction stir welds, Materials and Design, 32, (2011), 2021–2027.

[64] P. Alvarez, G. Janeiro, A.A. M. da Silva, E. Aldanondo, A. Echeverria, Material flow and mixing patterns during dissimilar FSW, Science and Technology of Welding and Joining, 15(8), (2010), 648-683.

[65] M. Guerra, C. Schmidt, J.C. McClure, L.E. Murr, A.C. Nunes, Flow patterns during friction stir welding, Materials Characterization, 49, (2003), 95– 101.

[66] W. Chuan-song, Z. Wen-bin, S. Lei, C. Mao-ai, Visualization and simulation of plastic material flow in friction stir welding of 2024 aluminium alloy plates, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 22, (2012), 1445-1451.

[67] C. Hamilton, S. Dymek, M. Blicharski, A model of material flow during friction stir welding, Materials characterization, 59, (2008), 1206 – 1214.

[68] А. Живковић, Утицај геометрије алата за поступак за поступак заваривања трењем помоћу алата на својства завареног споја легуре Al 2024, Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2011.

[69] Z.W. Chen, S. Cui, Tool work piece interaction and shear layer flow during friction stir welding of aluminum alloys, Transaction of Nonferrous Metal Society of China, 17, (2007), 258–261.

[70] Y. Li, L.E. Murr, J.C. McClure, Flow visualization and residual microstructures associated with the friction-stir welding of 2024 aluminum to 6061 aluminum, Materials Science and Engineering A, 271, (1999), 213–223.

[71] R. Nandan, G.G. Roy, T. Debroy, Numerical Simulation of Three-Dimensional Heat Transfer and Plastic Flow During Friction Stir Welding, Metallurgical and materials transactions A, 37, (2006), 1247-1259.

[72] T.U. Seidel, A.P. Reynolds, Visualization of the material flow in AA2195 Friction stir welds using a marker insert technique, Metallurgical and materials transactions A, 32, (2001), 2879-2884.

[73] K. Colligan, I. Ucok, K. McTernan, P. Konkol, J.R. Pickens, Friction Stir Welding of Thick Section 5083-H131 and 2195-T8P4 Aluminum Plates, Proceedings of the 3rd International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe Exhibition Center, Port Island, Kobe, Japan, September 2001.

[74] H. Lombard, D.G. Hattingh, A. Steuwer, M.N. James, Optimising FSW process parameters to minimise defects and maximise fatigue life in 5083-H321 aluminium alloy, Engineering Fracture Mechanics, 75, (2008), 341–354.

[75] W.M. Thomas, I.M. Norris, D.J. Staines, W. Lucas, The evaluation of root defects in FSW by „through hole“ impact testing – preliminary study, Published on the Internet, 28. July, 2005.

[76] B. Li, Y. Shen, W. Hu, The study on defects in aluminum 2219-T6 thick butt friction stir welds with the application of multiple non-destructive testing methods, Materials and Design, 32, (2011), 2073–2084.

[77] D.H. Lammlein, D.R. DeLapp, P.A. Fleming, A.M. Strauss, G.E. Cook, The application of shoulderless conical tools in friction stir welding: An experimental and theoretical study, Materials and Design, 30, (2009), 4012–4022.

[78] H. Liu, H. Zhang, Q. Pan, L. Yu, Effect of friction stir welding parameters on microstructural characteristics and mechanical properties of 2219-T6 aluminum alloy joints, Int J Mater Form, DOI 10.1007/s12289-011-1048-5, published online, april 2011.

[79] M.J. Brooker, A.J.M. van Deudekom, S.W. Kallee, P.D. Sketchey, Applying Friction Stir Welding to the Ariane 5 Main Thrust Frame, Proceedings of the 2nd International Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, June 2000.

[80] W.M. Thomas, A.B. Braithwaite, R. John, Skew-Stir™ Technology, Proceedings of the 4th International Symposium on Friction Stir Welding, May 2003.

[81] D.G. Hattingh, C. Blignaulta, T.I. van Niekerk, M.N. James, Characterization of the influences of FSW tool geometry on welding forces and weld tensile strength using an instrumented tool, Journal of materials processing technology, 203, (2008), 46–57.

[82] C.D. Sorensen, T.W. Nelson, S.M. Packer, Progress in Polycrystalline Cubic Boron Nitride FSW Tooling, Proceedings of the 4th International Symposium on Friction Stir Welding, May 2003.

[83] M. Santella, G. Grant, W. Arbegast, Plunge testing to evaluate tool materials for friction stir welding, Proceedings of the 4th International Symposium on Friction Stir Welding, May 2003.

[84] K. Kumar, Satish V. Kailas, The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation, Materials Science and Engineering A, 485, (2008), 367–374.

[85] T. Shinoda, Effect of Tool Angle on Metal Flow Phenomenon in Friction Stir Welds, 3rd International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe Exhibition Center, Port Island, Kobe, Japan, 27-28 September 2001.

[86] Y. Kwon, S. Shim, D. Park, Friction stir welding of 5052 aluminum alloy plates, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 19,(2009), 23−27.

[87] http://www.twi.co.uk/j32k/getFile/fswproc.html, Friction Stir Welding - Process advantages.

[88] D.L. Hallum, A promising new process, friction stir welding, uses readily available equipment to create high-quality joints in hard-to-weld alloys, Forming and Fabricating, 7(10), 2000.

[89] J. Baggs, Marshall Star, Serving the Marshall Space Flight Center Community, Jan.24, 2002.

[90] http://www.twi.co.uk/j32k/getFile/fswmat.html, Friction Stir Welding - Materials and thicknesses.

[91] Д. Вељић, Експериментална и нумеричка термомеханичка анализа процеса заваривања трењем мешањем легура алуминијума високе чврстоће, Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2012.

[92] L. Fratini, G. Buqa, D. Palmeri, J. Hua, R. Shivpuri, Material flow in FSW of AA7075-T6 butt joints: Numerical simulations and experimental verifications, Science and Technology of Welding and Joining, 11, (2006), 412–421.

[93] A.P. Reynolds, F. Duvall, Digital Image Correlation for Determination of Weld and Base Metal Constitutive Behavior, The Welding Journal Research Supplement, 78, (1999), 355-360.

[94] T. Hirata, T. Oguri, H. Hagino, T. Tanaka, S.W. Chung, Y. Takigawa, K. Higashi, Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy, Materials Science and Engineering A, 456, (2007), 344–349.

[95] Y.S. Sato, Y. Sugiura, H. Kokawa, Hardness Distribution and Microstructure in Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 5052, Proceedings of the 4th International Symposium on Friction Stir Welding, 14-16 May, 2003.

[96] K.V. Jata, K.K. Sankaran, J.J. Ruschau, Friction Stir Welding Effects on Microstructure and Fatigue of Aluminum Alloy 7050-T7451, Metallurgical and Materials Transactions A, 31, (2000), 2181-2192.

[97] Y. Sato, H. Kokawa, M. Enomoto, S. Jogan, T. Hashimoto, Precipitation Sequence in Friction Stir Weld of 6063 Aluminum during Aging, Metallurgical and Materials Transactions A, 30, (1999), 3125-3130.

[98] G. Oertlet, S.S. Babu, S.A. David, E.A. Kenik, Effect of Thermal Cycling on Friction Stir Welds of 2195 Aluminum Alloy, The Welding Journal, 80, (2001), 71-79.

[99] A. Squillace, A. De Fenzo, G. Giorleo, F. Bellucci, A comparison between FSW and TIG welding techniques: modifications of microstructure and pitting corrosion resistance in AA 2024-T3 butt joints, Journal of Materials Processing Technology 152, (2004), 97–105.

[100] G. Cao, S. Kou, Friction Stir Welding of 2219 Aluminum: Behavior of θ (Al_2Cu) particles, Welding Journal, January, (2005), 1–8.

[101] D.P. Booth, M.J. Starink, I. Sinclair, Analysis of Local Microstructure and Hardness of 13mm gauge 2024-T351 AA Friction Stir Welds, Materials Science and Technology, 23(3), (2007), 276-284.

[102] S. Lim, S. Kim, C. Lee, S. Kim, Mechanical Properties of Friction Stir Welded Al Alloys with Different Hardening Mechanisms, Metals and materials International, 11(2), (2005), 113-120.

[103] A.P. Reynolds, K. Lindner, W. Tang, University of South Carolina, Unpublished Research

[104] H. Aydın, A. Bayram, A. Uguz, K.S. Akay, Tensile properties of friction stir welded joints of 2024 aluminum alloys in different heat-treated-state, Materials and Design, 30, (2009), 2211–2221.

[105] H.J. Liu, H. Fuji, M. Maeda, K. Nogi, Tensile properties and fracture locations of friction-stir-welded joints of 2017-T351 aluminum alloy, Journal of Materials Processing Technology, 142, (2003), 692–696.

[106] W. Xu, J. Liu, G. Luan, C. Dong, Temperature evolution, microstructure and mechanical properties of friction stir welded thick 2219-O aluminum alloy joints, Materials and Design, 30, (2009), 1886–1893.

[107] H.J. Liu, H. Fuji, M. Maeda, K. Nogi, Comparative study on fracture locations on friction stir welded joints for different types of aluminium alloys, Proceedings of 4th International Symposium on FSW, Park City, Utah, 14-16 May, 2003.

[108] C. Genevois, A. Deschamps, P. Vacher, Comparative study on local and global mechanical properties of 2024 T351, 2024 T6 and 5251 O friction stir welds, Materials Science and Engineering A, 415, (2006), 162–170.

[109] Љ. Ђапић, А. Иванковић, A. Oosterkamp, Initiation Fracture Toughness of Friction Stir Welds in Commercial Aluminium Alloys Under Rapid Loading, 2nd ISFSW, Gothenburg, Sweden, 26–28 June, 2000.

[110] A. von Strombeck, J. dos Santos, F. Torster, P. Lauerano, M. Kocak, Fracture toughness behavior of FSW joints on aluminum alloys, Proceedings of the 1st Int. Conf. on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, TWI, paper on CD, June 14-16, 1999.

[111] M.G. Dawes, S.A. Karger, T.L. Dickerson, J. Pryzdatek, Strength and Fracture Toughness of Friction Stir Welds in Aluminum Alloys, Proceedings of the 2nd International Symposium on FSW, Gothenburg, Sweden, 26-28 June, 2000.

[112] M.A. Sutton, A.P. Reynolds, B. Yang, R. Taylor, Mode I Fracture and Microstructure for 2024-T3 Friction Stir Welds, Materials Science and Engineering A, 354, (2003), 6-16.

[113] H.R. Kroninger, A.P. Reynolds, R-Curve Behavior of Friction Stir Welds in Aluminum-Lithium Alloy 2195, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 25(3), (2002), 283-290.

[114] G. Bussu, E. Irving, Static and Fatigue Performance of Friction Stir Welded 2024- T351 Aluminum Joints, Proceedings of the 1st ISFSW, Thousand Oaks, CA, June 1999.

[115] S. Di, X. Yang, G. Luan, B. Jian, Comparative study on fatigue properties between AA2024-T4 friction stir welds and base materials, Materials Science and Engineering A, 435–436, (2006), 389–395.

[116] Y.J. Chao, Y. Wang, K.W. Miller, Effect of Friction Stir Welding on Dynamic properties of AA2024-T3 and AA7075-T7351, Welding research supplement, August 2001, 196-200.

[117] M. Kumagai, S.Tanaka, Properties of Aluminum Wide Panels by Friction Stir Welding, 1st ISFSW, Rockwell Science Center, Thousand Oaks, USA, 14 – 19 June, 1999.

[118] M. Kumagai, S.Tanaka, H. Hatta, H. Yoshida, H. Sato, Integral Wing Panel for Airplanes Produced by Friction Stir Welded Extrusion, Proceedings of the 3rd International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe Exhibition Center, Port Island, Kobe, Japan, September 2001.

[119] S. Malarvizhi, V. Balasubramanian, Fatigue crack growth resistance of gas tungsten arc, electron beam and friction stir welded joints of AA2219 aluminium alloy, Materials and Design, 32, (2011), 1205–1214.

[120] L. Fratini, S. Pasta, A.P. Reynolds, Fatigue crack growth in 2024-T351 friction stir welded joints: Longitudinal residual stress and microstructural effects, International Journal of Fatigue, 31, (2009), 495–500.

[121] Q. Shi, T. Dickerson, H.R. Shercliff, Thermo-Mechanical FE Modelling of Friction Stir Welding of Al-2024 Including Tool Loads, Proceedings of the 4th International Symposium on Fricion Stir Welding, 14-16 May, 2003.

[122] C. Chen, R. Kovacevic, Thermo mechanical modeling and force analysis of friction stir welding by the finite element method, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers; May 2004; 218, 5; ProQuest Central pg. 509.

[123] A. Arora, Z. Zhang, A. De, T. DebRoy, Strains and strain rates during friction stir welding, Scripta Materialia, 61, (2009), 863–866.

[124] S. Hirano, K. Okamoto, K. Aota, H. Okamura, Y. Aono, T. Odakura, Development of 3 dimensional type friction stir welding equipment, Proceedings of 3rd International Symposium on Friction Stir Welding, Kobe Exibition Center, Port Island, Kobe, Japan, September 2001.

[125] M.J. Greitman, P. Deimel, Friction Stir Welding – Innovative Technology for Joining Aluminium Components, Otto-Graf Journal, 16, (2005).

[126] H. Bisadi, A. Tavakoli, M. Tour Sangsaraki, K. Tour Sangsaraki, The influences of rotational and welding speeds on microstructuresand mechanical properties of friction stir welded Al5083 and commercially pure copper sheets lap joints, Materials and Design, 43, (2013), 80–88.

[127] Y. Zhao, S. Lin, L. Wu, F. Qu, The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy, Materials Letters, 59, (2005), 2948–2952.

[128] Kh A.A. Hassan, A.F. Norman, P.B. Prangnell, The effect of welding conditions on the microstructure mechanical properties of the nugget zone AA7100 alloy friction stir welds.

[129] P. Dong, F. Lu, J.K. Hong, Analysis of Weld Formation Process in Friction Stir Welding, 1st International Symposium on Friction Stir Welding @ Thousand Oaks, Cal June 1999.

[130] Y. Sato, M. Urata, H. Kokawa: Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063. Metallurgical & Materials Transactions A, 33(3), (2002), 625–635.

[131] M.J. Peel, A. Steuwer, P.J. Withers, T. Dickerson, Q. Shi, H. Shercliff, Dissimilar friction stir welds in AA5083-AA6082 Part I: Process parameter effects on thermal history and weld properties, Metallurgical and Materials Transactions A, 37 (7), (2006), 2183–2193.

[132] E. Roos, U. Henneböhle, E. Schofer, W. Osten, M.J. Greitmann, Integration moderner Fügeverfahren in die Fertigung am Beispiel des Rührreibschweißens, DVS-Forschungsseminar 27. Januar 2005.

[133] И. Радисављевић, Анализа утицаја параметара заваривања легуре алуминијума 2024 поступком трењем алатом на механичке, структурне и технолошке особине, Технички извештај, ТИ- ВТИ-004-01-0624, Београд, 2010.

[134] И. Радисављевић, А. Живковић, Н. Радовић, В. Грабулов, Influence of FSW parameters on formation quality and mechanical properties of Al 2024-T351 butt welded joints, Transaction of Nonferrous Metals Society China, 23, (2013), 3525-3539.

[135] M. Abbasi Gharacheh, A.H. Kokabi, G.H. Daneshi, B. Shalchi, R. Sarrafi, The influence of the ratio of ‘‘rotational speed/traverse speed’’ (ω/v)on mechanical properties of AZ31 friction stir welds, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46, (2006), 1983–1987.

[136] R. Johnson, Forces in Friction Stir Welding of Aluminium Alloys, Post.05 First International Symposium on Fricion Stir Welding, Thousand Oaks, CA, June 1999.

[137] A. Rose, K. Manisekar, V. Balasubramanian, Effect of axial force on microstructure and tensile properties of friction stir welded AZ61A magnesium alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 21, (2011), 974-984.

[138] T. Shinoda, H.Tokisue, M.Enomoto, H.Hori, S.Koga, M.Kumagai, K.Matsumoto, H.Okamura, K.Tsuchiy, Recent Trends of Research and Development of FSW Technology in Japan, 3rd International Symposium on Fricion Stir Welding, Kobe Exibition Center, Port Island, Kobe, Japan, 27-28 September 2001.

[139] Certificate of conformity, ALCOA International, Inc, Approved Certificate No. 47831, date 21.10.1990.

[140] ASTM Standard E-8M, Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, DOI: 10.1520/E0008_E0008M, www.astm.org.

[141] SRPS EN 10002-1, Метални материјали – Испитивање затезањем – Део 1: Метода (испитивање на собној температури), ИСС, Београд, 1996.

[142] SRPS C.A4.030, Механичка испитивања метала – Испитивање тврдоће по Викерсу (од HV 5 до HV 100), ИСС, Београд, 1986.

[143] SRPS EN-970, Испитивања без разарања - Испитивање заварених спојева изведених топљењем - Визуелно испитивање, ИСС, Београд, 2003.

[144] SRPS EN 571-1, Испитивања без разарања - Испитивања пенетрантима - Део 1: Општи принципи, Савезни завод за стандардизацију, ИСС, Београд, 2005.

[145] SRPS EN 1435, Испитивања заварених спојева методама без разарања - Радиографско испитивање заварених спојева, ИСС, Београд, 2007.

[146] SRPS C.T3.051, Техника варења метала, Испитивање квалитета заварених спојева – Испитивање разарањем челичних спојева заварених електролучно или плински, ИСС, Београд, 1961.

[147] SRPS C.T3.055, Заваривање, Сучеони заварени спојеви изведени топљењем челика – Испитивање савијањем са лица и корена шава, ИСС, Београд, 1984.

[148] SRPS C.A4.040, Механичка испитивања метала – Испитивање тврдоће по Викерсу (од HV 0,2 до испод HV 5), ИСС, Београд, 1986.

[149] SRPS EN 10045-1, Механичка испитивања метала – Испитивање ударом по Шарпију – Део 1: Метода испитивања, ИСС, Београд, 1993.

[150] ASTM G 34-01, Standard Test Method for Exfoliation Corrosion Susceptibility in 2XXX and 7XXX Series Aluminum Alloys (EXCO Test), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, DOI: 10.1520/G0034, www.astm.org.

[151] I. Radisavljevic, A. Zivkovic, V. Grabulov, N. Radovic, Influence of pin geometry on mechanical and structural properties of butt Friction Stir Welded 2024-T351 aluminum alloy, Hemijska industrija, 2014, DOI:10.2298/HEMIND131206020R

[152] I. Radisavljević, N. Radović, V. Grabulov, M. Nikačević, Influence of process parameters on tunnel type defect appearance and weld quality in FSW welded Al 2024 plates, 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies, OTEH 2012, Serbia, Belgrade, 18-19 September 2012, Proceedings on CD, 625-630.

[153] I. Radisavljevic, A. Zivkovic, N. Radovic, Avoidance of tunnel type defect in fsw welded Al 5052-H32 plates, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 1, 2012, 5-12.

[154] H. Schmidt, J. Hattel, J. Wert, An analytical model for the heat generation in friction stir welding, Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 12, (2004), 143–157.

[155] S. Rajakumar, V. Balasubramanian, Correlation between weld nugget grain size, weld nugget hardness and tensile strength of friction stir welded commercial grade aluminium alloy joints, Materials and Design, 34, (2012), 242–251.

[156] M.J. Jones, P. Heurtier, C. Desrayaud, F. Montheillet, D. Allehaux, J.H. Driver, Correlation between microstructure and microhardness in a friction stir welded 2024 aluminium alloy, Scripta Materialia, 52, (2005), 693–697.

[157] Ђ. Дробњак, Физичка металургија – Физика чврстоће и пластичности 1, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 1990.

[158] Е. Ромхањи, Механика и металургија деформације метала, Технолошко-металуршки факултет, Београд, 2001.

[159] K.V. Jata, S.L. Semiatin, Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys, Scripta mater. 43, (2000), 743–749.

[160] L.E. Murr, G. Liu, J.C. McClure, Dynamic recrystallization in friction-stir welding of aluminium alloy 1100, Journal of materials science letters, 16, (1997), 1801-1803.

[161] A.C. Munoz, G. Ruckert, B. Huneau, X. Sauvage, S. Marya, Comparison of TIG welded and friction stir welded Al–4.5Mg–0.26Sc alloy, Journal of materials processing technology, 197, (2008), 337–343.

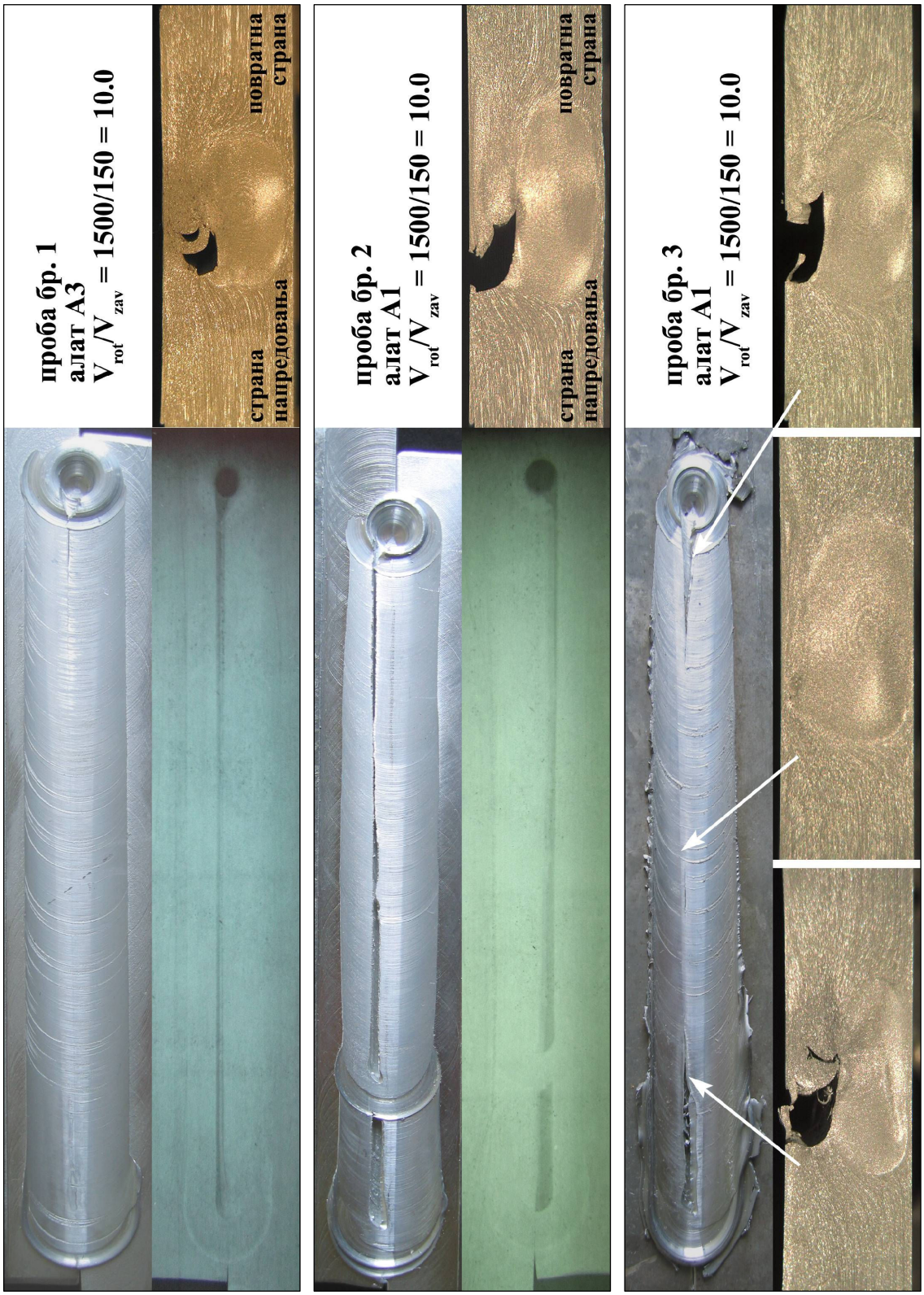
[162] M. Jariyaboon, A.J. Davenport, R. Ambat, B.J. Connolly,S.W. William, D.A. Price, The effect of welding parameters on the corrosion behaviour of friction stir welded AA2024–T351, Corrosion Science, 49, (2007), 877–909.

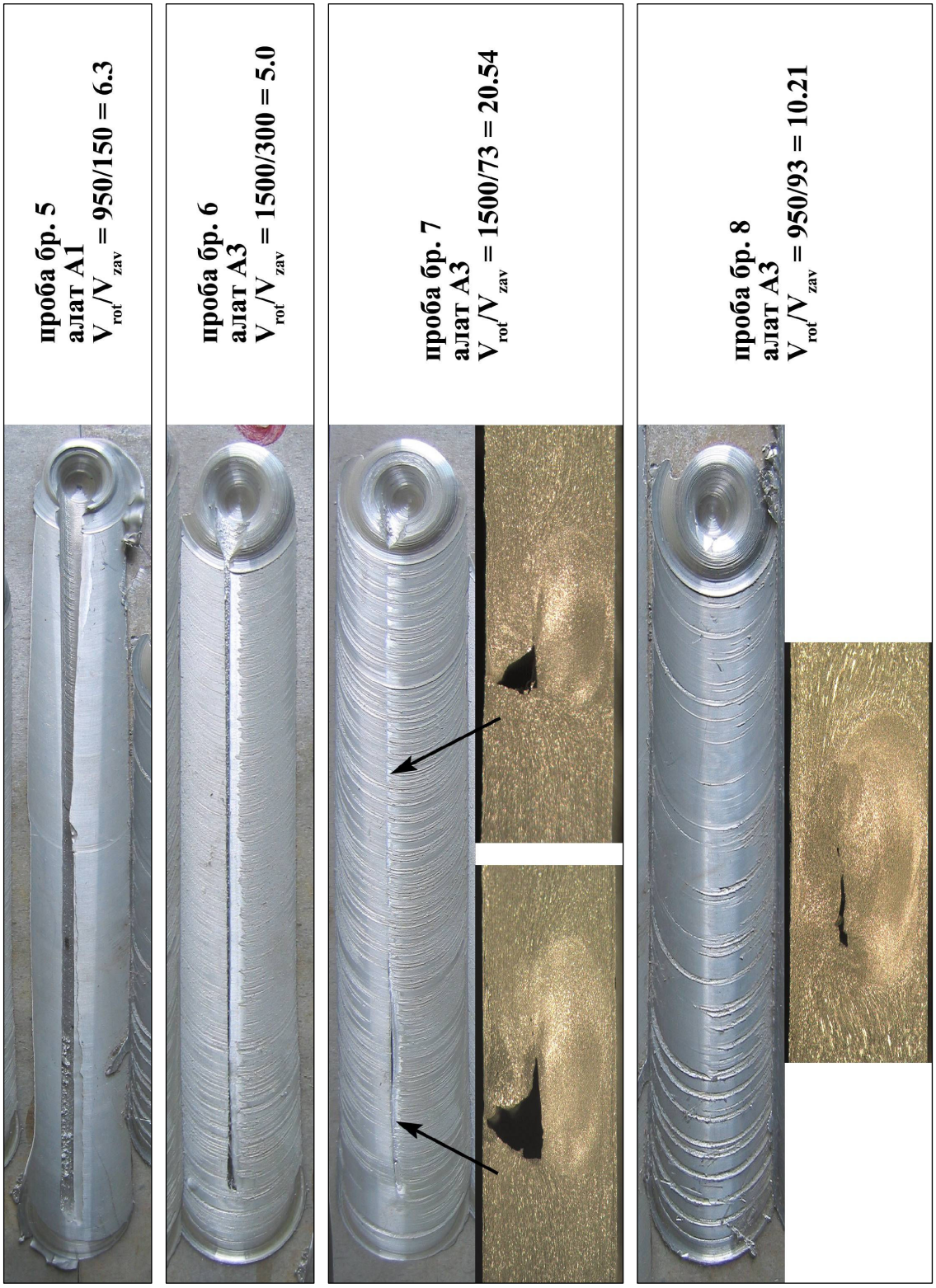
[163] J. Corral, E.A. Trillo, Ying Li, L.E. Murr, Corrosion of friction-stir welded aluminum alloys 2024 and 2195, Journal of materials science letters, 19, (2000), 2117 – 2122.

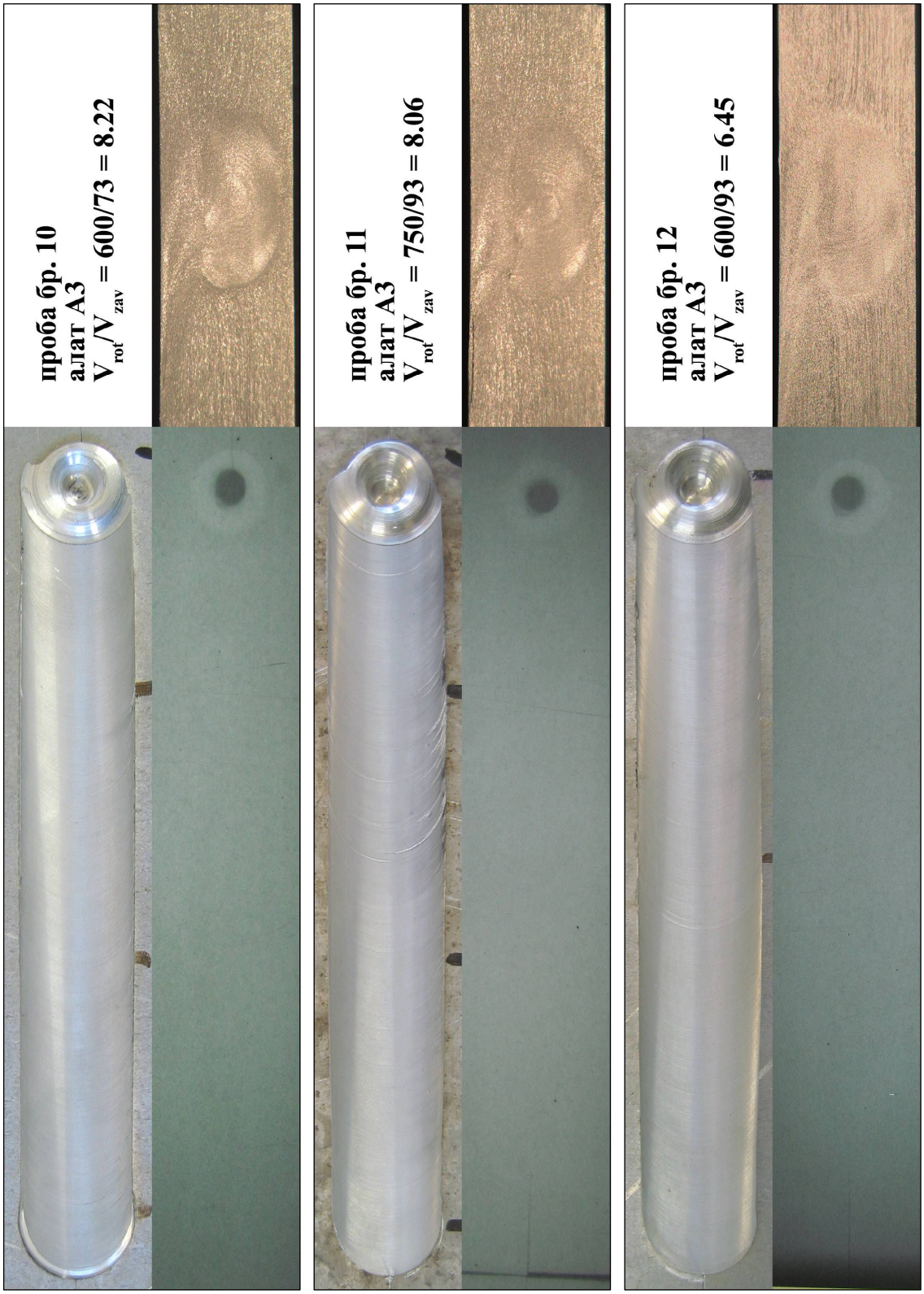
[164] H. Bouzaiene, M. Rezgui, M. Ayadi, A. Zghal, Correlation between welding and hardening parameters of friction stir welded joints of 2017 aluminum alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 22, (2012), 1064-1072.

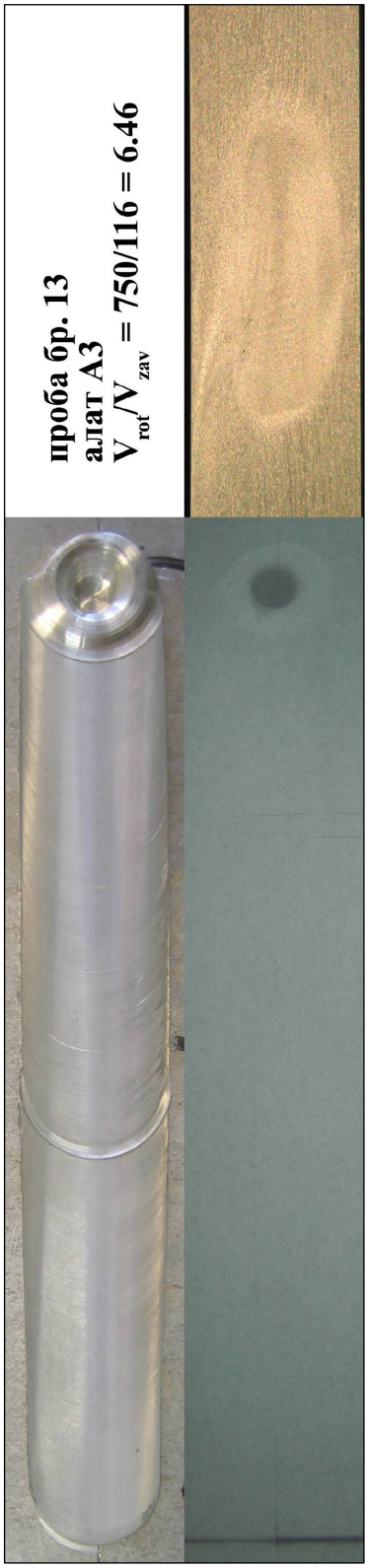
[165] J.A. Walsh, K.V. Jata, E.A. Starke Jr, The influence of Mn dispersoid content and stress state on ductile fracture of 2134 type Al alloys, Acta Metall., 37, (11), (1989), 2861–2871.

[166] K. Surekha, B.S. Murty, K. Prasad Rao, Effect of processing parameters on the corrosion behaviour of friction stir processed AA 2219 aluminum alloy, Solid State Sciences, 11, (2009), 907–917.

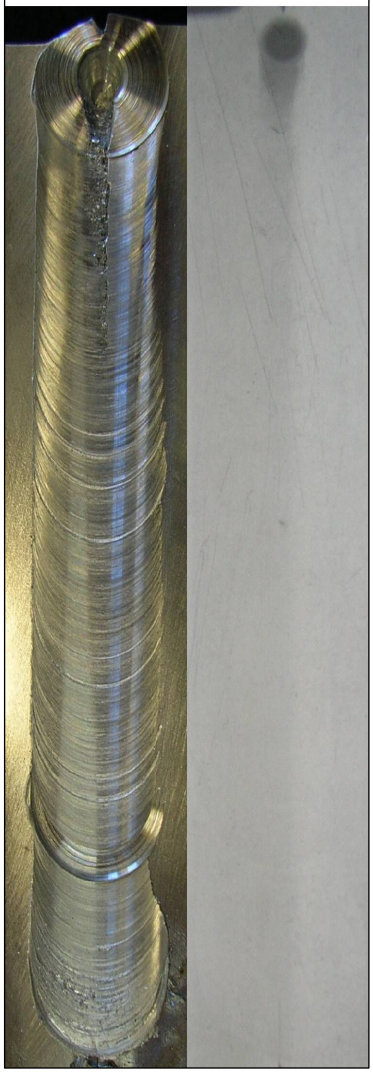

проба бр. 1
алат А3
V_{rot}/V_{zav} = 1500/150 = 10.0
страна напредовања
повратна страна
проба бр. 2
алат А1
V_{rot}/V_{zav} = 1500/150 = 10.0
страна напредовања
повратна страна
проба бр. 3
алат А1
V_{rot}/V_{zav} = 1500/150 = 10.0


проба бр. 5
алат А1
V_{rot}/V_{zav} = 950/150 = 6.3
проба бр. 6
алат А3
V_{rot}/V_{zav} = 1500/300 = 5.0
проба бр. 7
алат А3
V_{rot}/V_{zav} = 1500/73 = 20.54
проба бр. 8
алат А3
V_{rot}/V_{zav} = 950/93 = 10.21


проба бр. 10
алат А3
V_{rot}/V_{zav} = 600/73 = 8.22
проба бр. 11
алат А3
V_{rot}/V_{zav} = 750/93 = 8.06
проба бр. 12
алат А3
V_{rot}/V_{zav} = 600/93 = 6.45

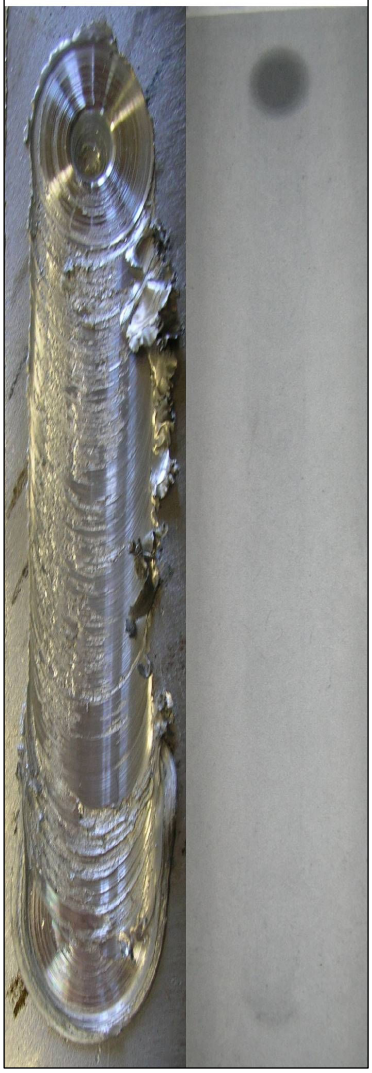


проба бр. 13
алат А3
V_{rot}/V_{zav} = 750/116 = 6.46

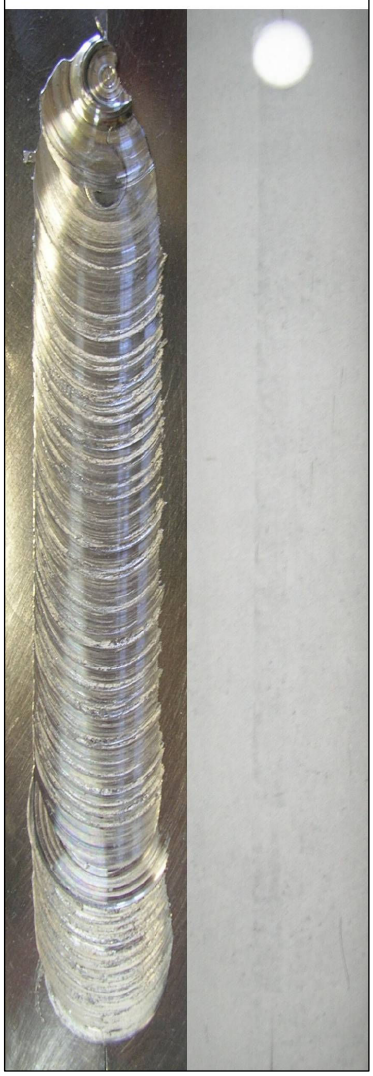


проба бр. 3
алат 02-04
V_{rot}/V_{zav} = 950/58 = 16.38

проба бр. 4
алат 02-04
V_{rot}/V_{zav} = 950/73 = 13.01

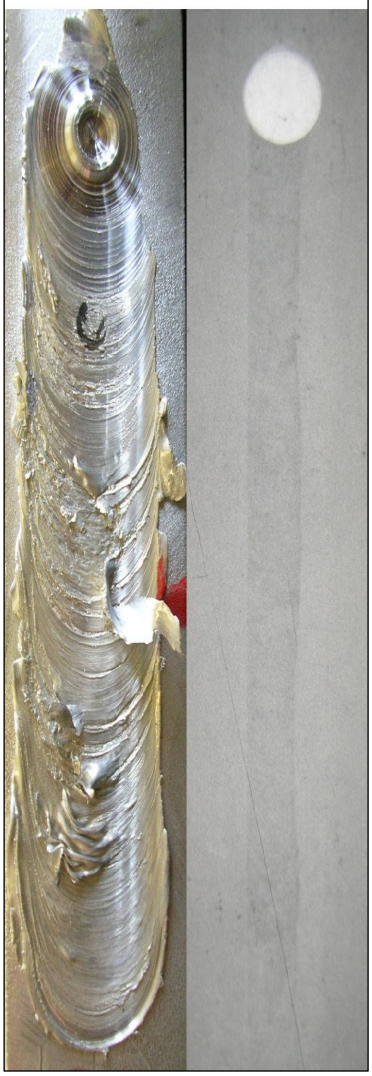


проба бр. 5
алат 02-04
V_{rot}/V_{zav} = 950/116 = 8.19

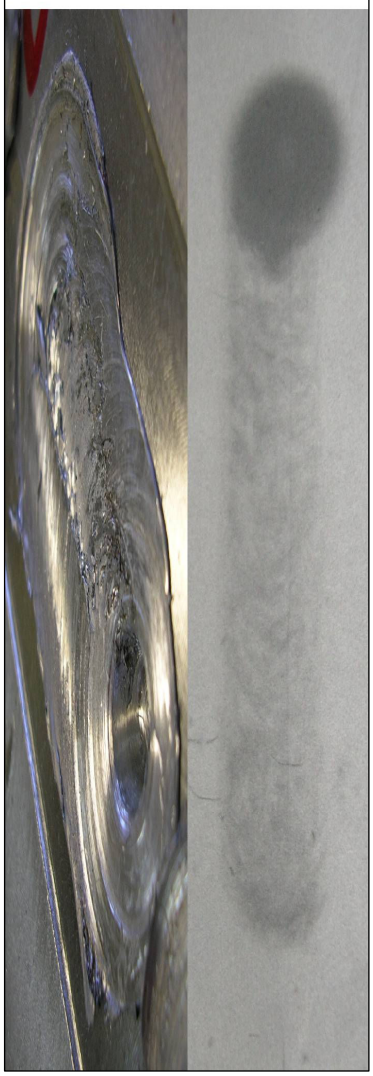


проба бр. 6
алат 04
V_{rot}/V_{zav} = 950/58 = 16.38

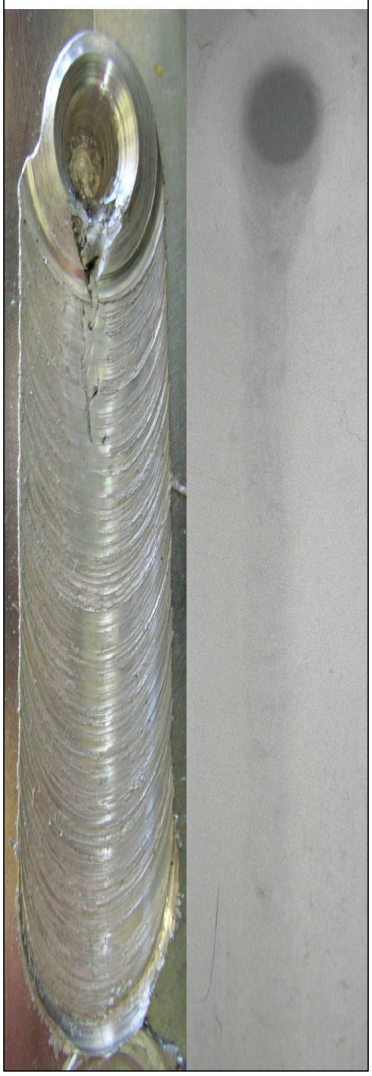
проба бр. 7
алат 04
V_{rot}/V_{zav} = 950/58 = 16.38



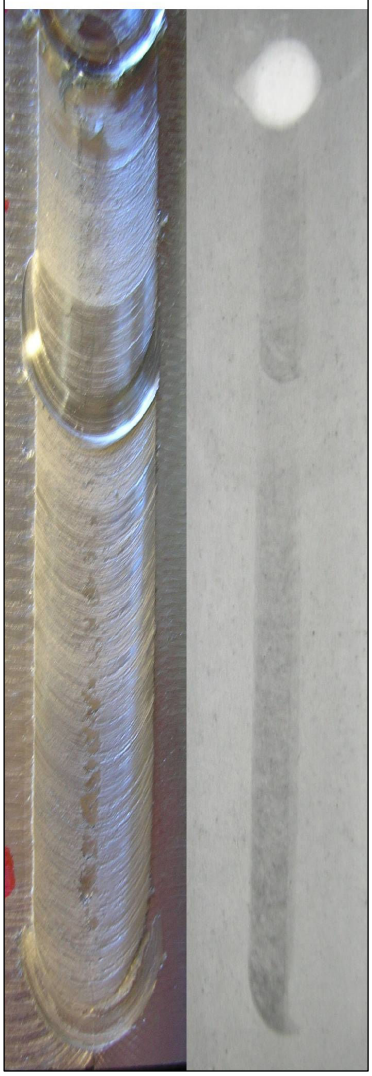
проба бр. 8
алат 04
V_{rot}/V_{zav} = 950/73 = 13.01



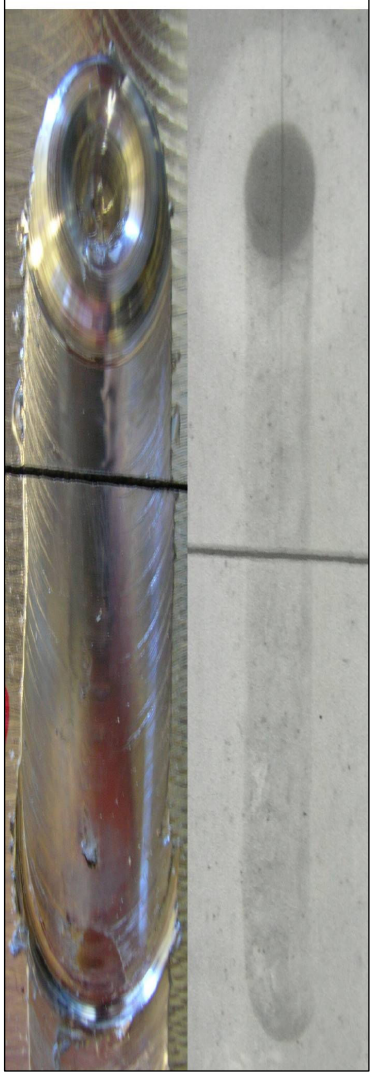
проба бр. 9
алат 02-03
V_{rot}/V_{zav} = 950/58 = 16.38



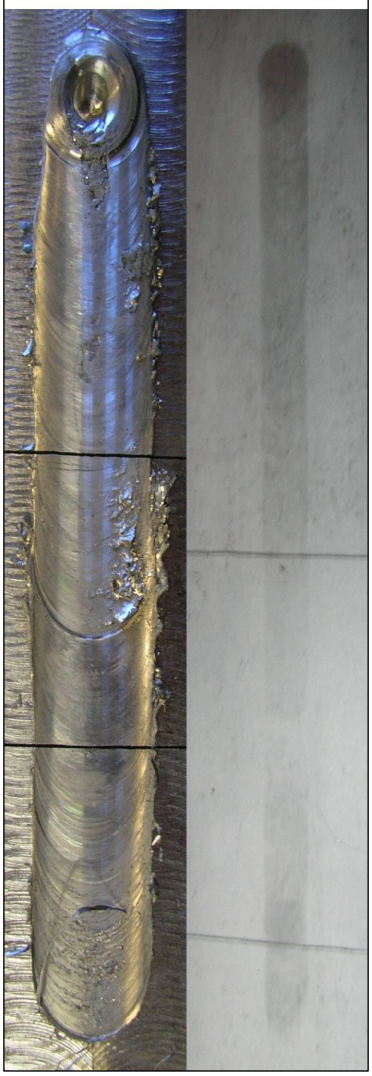
проба бр. 10
алат 02
V_{rot}/V_{zav} = 1180/58 = 20.34



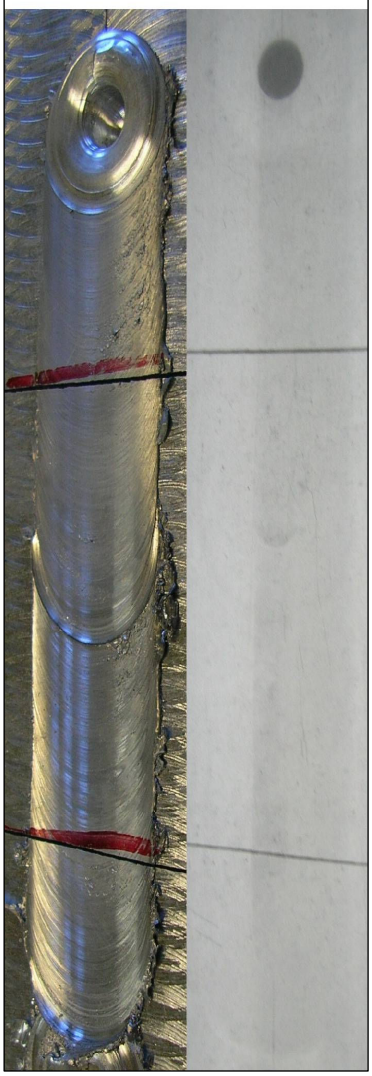
проба бр. 11
алат 04
V_{rot}/V_{zav} = 1180/116 = 10.17



проба бр. 12
алат РЋ
V_{rot}/V_{zav} = 1180/93 = 12.68



проба бр. 13
алат РЋ
V_{rot}/V_{zav} = 1180/73 = 16.16

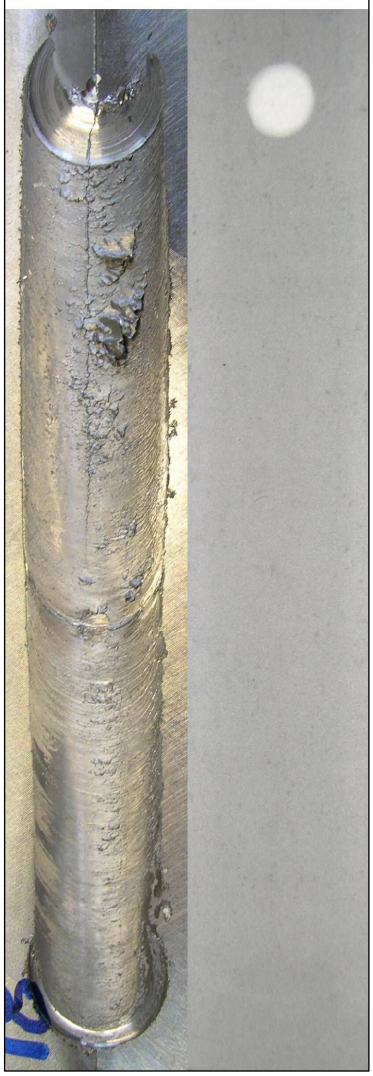


проба бр. 14
алат РЋ
V_{rot}/V_{zav} = 1180/46 = 25.65

проба бр. 15
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 1180/116 = 10.17

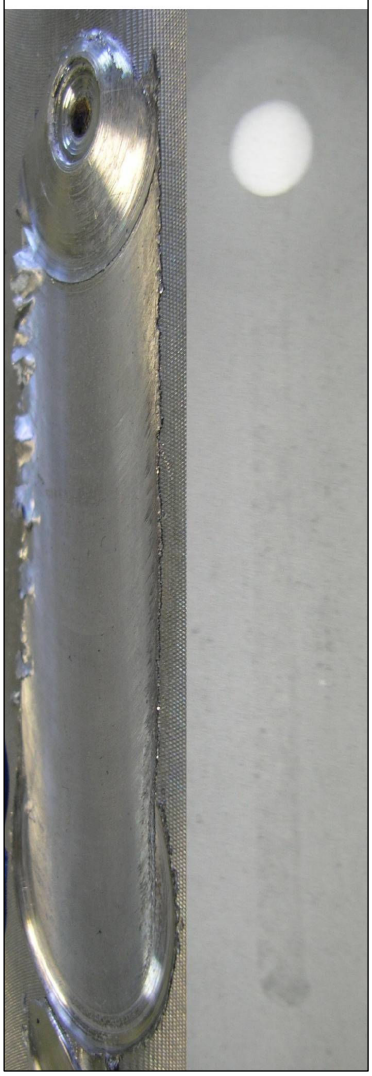
проба бр. 16
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 1180/58 = 20.34

проба бр. 17
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 1180/29 = 40.69



проба бр. 18
алат 313
V_{rot}/V_{zav} = 1180/58 = 20.34

проба бр. 19
алат 316
V_{rot}/V_{zav} = 1180/116 = 10.17



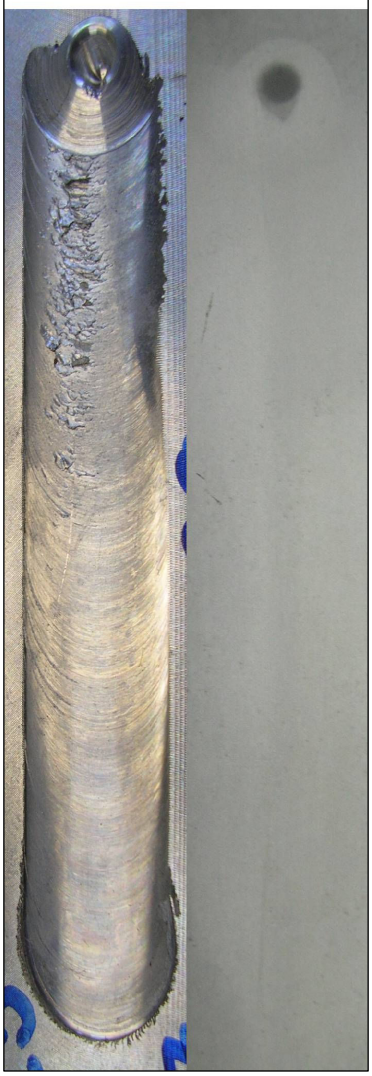
проба бр. 20
алат 308
V_{rot}/V_{zav} = 1180/116 = 10.17

проба бр. 21
алат 308
V_{rot}/V_{zav} = 1180/58 = 20.34

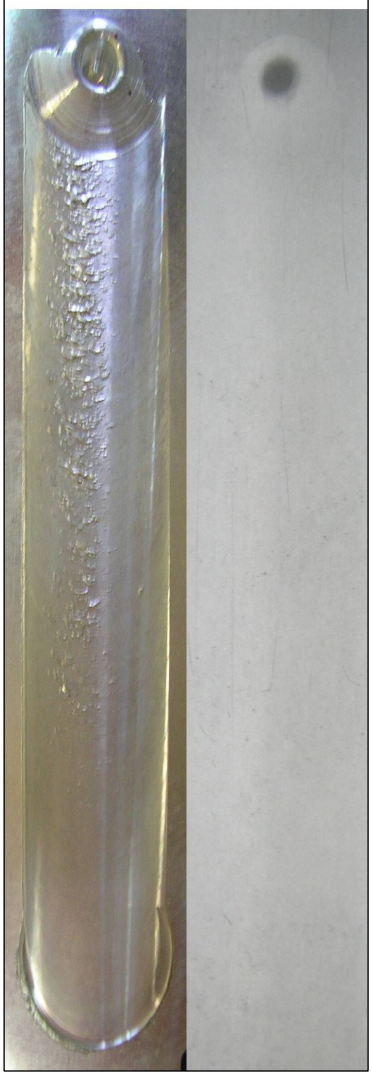
проба бр. 22
алат 317
V_{rot}/V_{zav} = 1180/46 = 25.65

проба бр. 23
алат 317
V_{rot}/V_{zav} = 1180/116 = 10.17

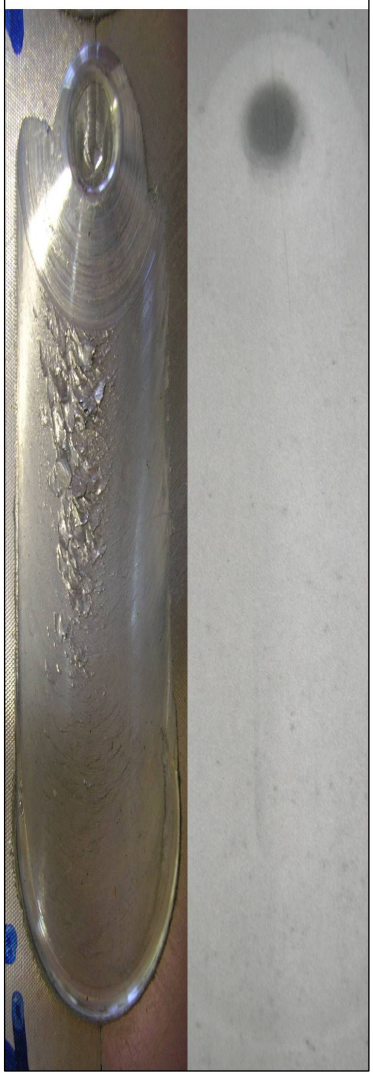
проба бр. 24
алат 317
V_{rot}/V_{zav} = 1180/23 = 51.30



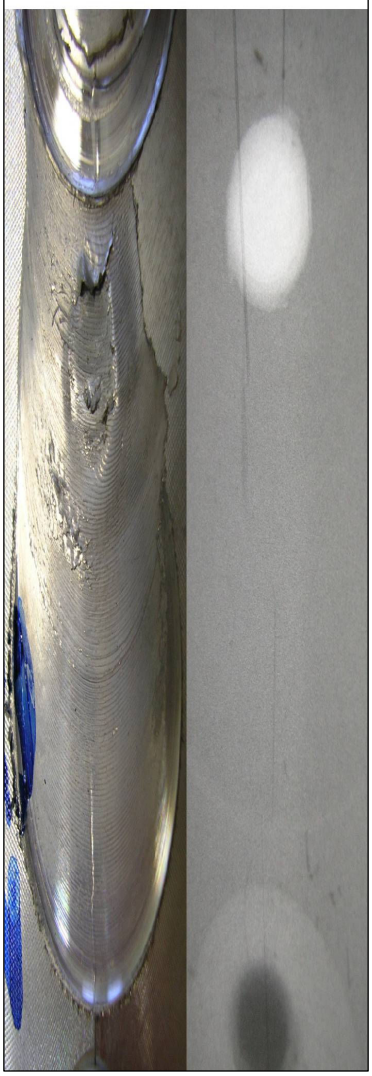
проба бр. 25
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 750/73 = 10.27



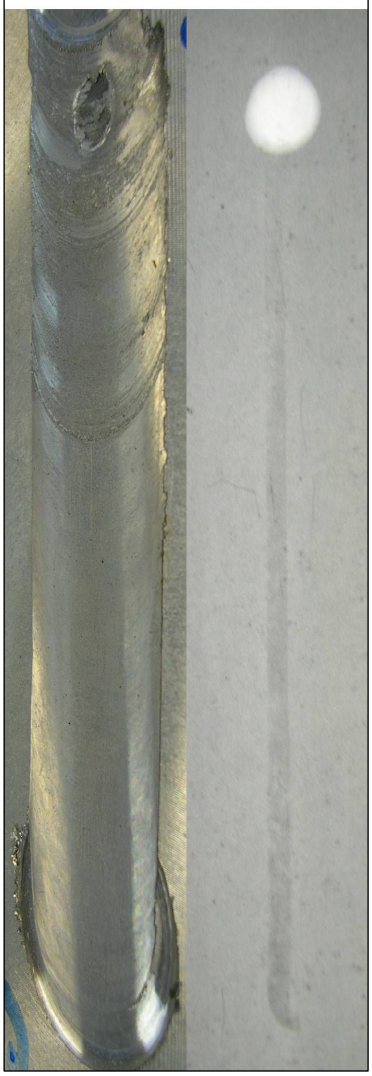
проба бр. 26
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 750/93 = 8.06



проба бр. 27
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 750/116 = 6.46

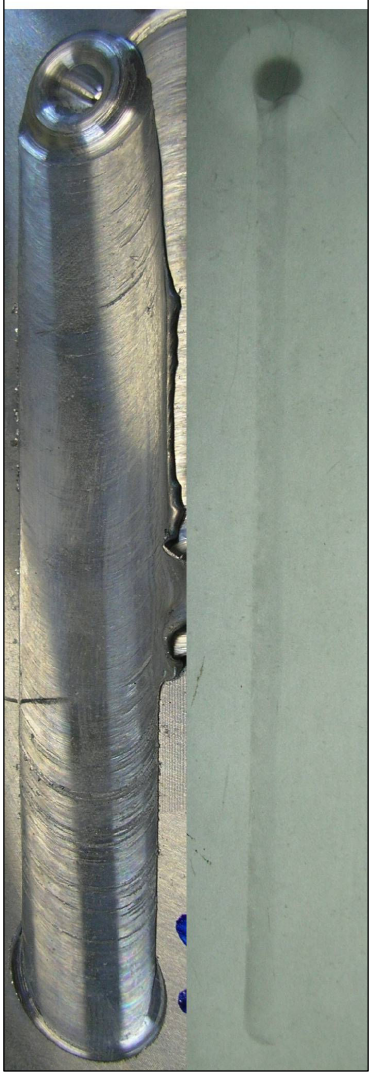


проба бр. 28
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 750/150 = 5.00



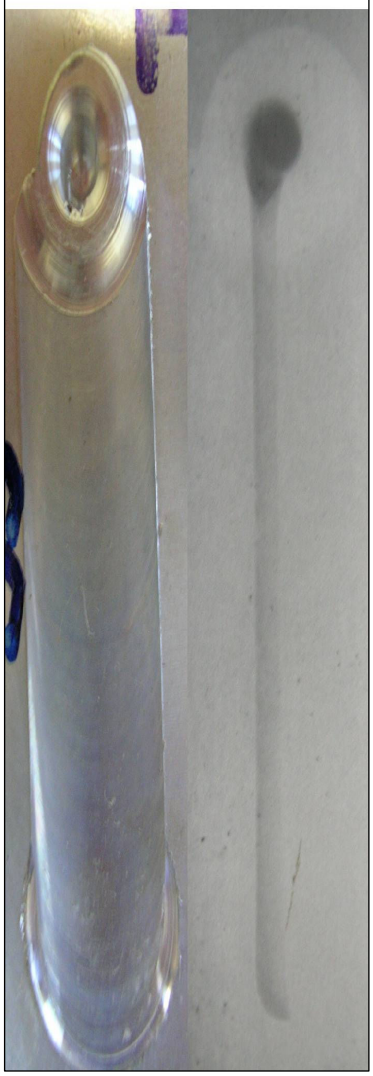
проба бр. 29
алат 308
V_{rot}/V_{zav} = 750/73 = 10.27

проба бр. 30
алат PĦ
V_{rot}/V_{zav} = 750/73 = 10.27



проба бр. 31
алат 10
V_{rot}/V_{zav} = 750/73 = 10.27

проба бр. 32
алат 10
V_{rot}/V_{zav} = 750/73 = 10.27

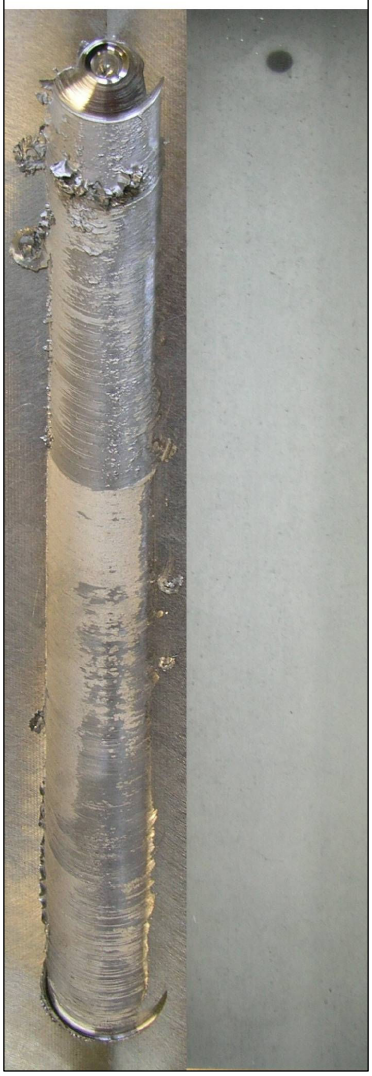


проба бр. 33
алат РЋ
V_{rot}/V_{zav} = 750/73 = 10.27

проба бр. 34
алат РЋ
V_{rot}/V_{zav} = 750/93 = 8.06

проба бр. 35
алат РЋ
V_{rot}/V_{zav} = 750/58 = 12.93

проба бр. 36
алат PĥĤ
V_{rot}/V_{zav} = 750/150 = 5.00

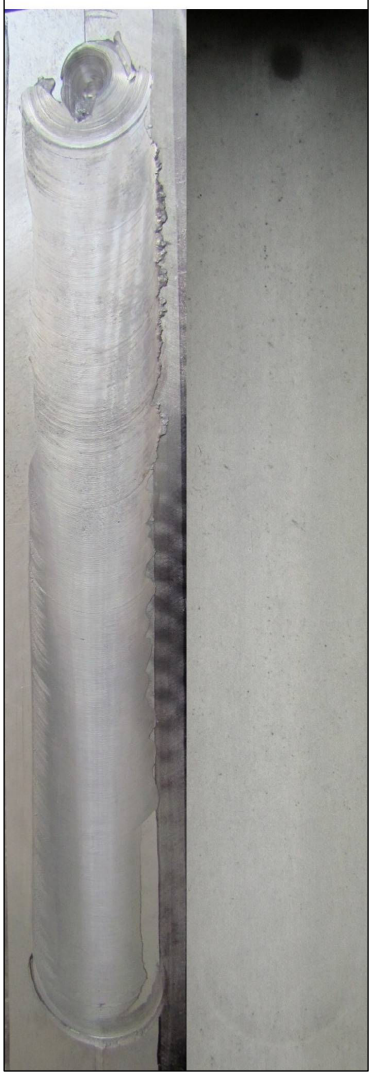


проба бр. 37
алат 313
V_{rot}/V_{zav} = 1180/46 = 25.65

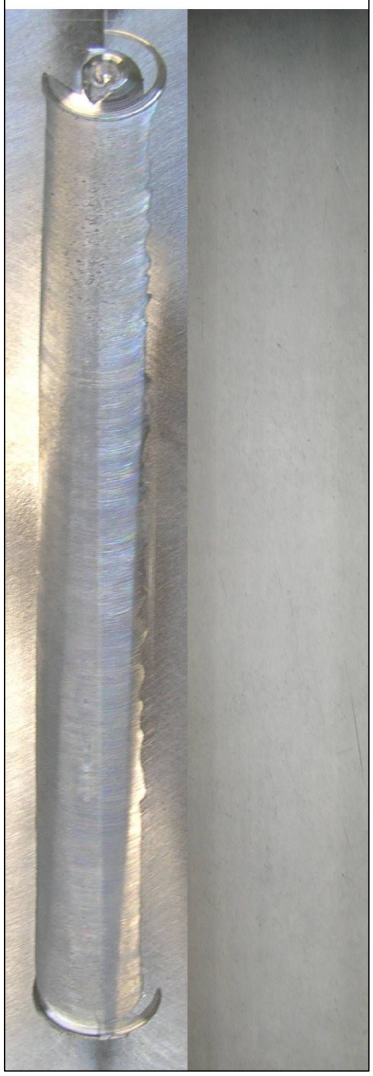
проба бр. 38
алат 317
V_{rot}/V_{zav} = 1180/23 = 51.30

проба бр. 39
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 1180/116 = 10.17

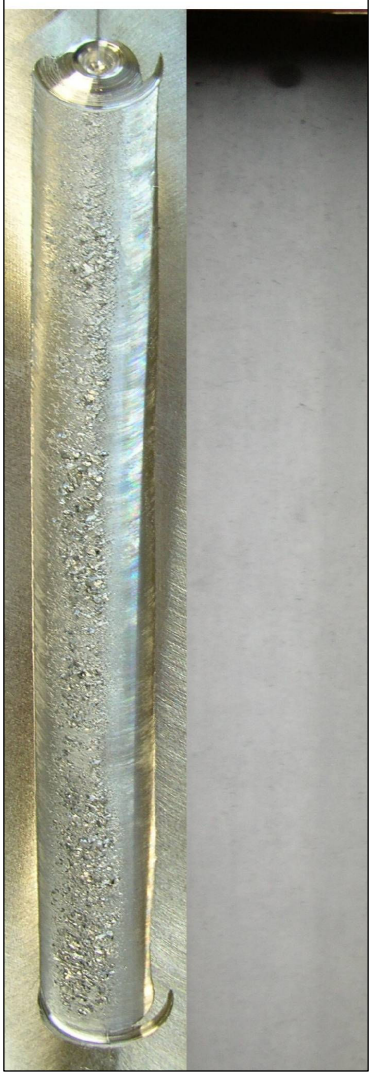
проба бр. 40
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 1180/46 = 25.65



проба бр. 41
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 750/150 = 5.00

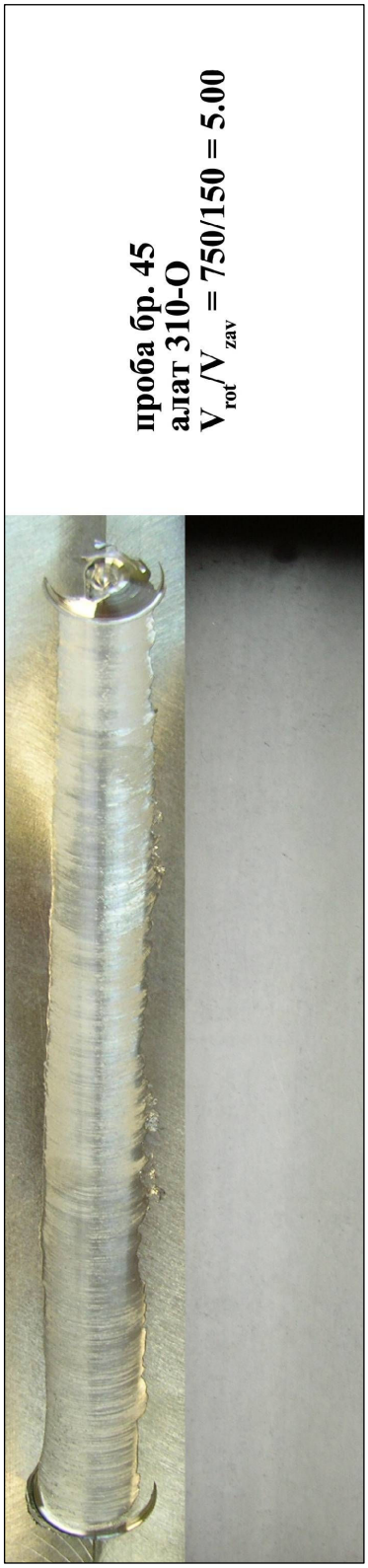


проба бр. 42
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 750/116 = 6.46

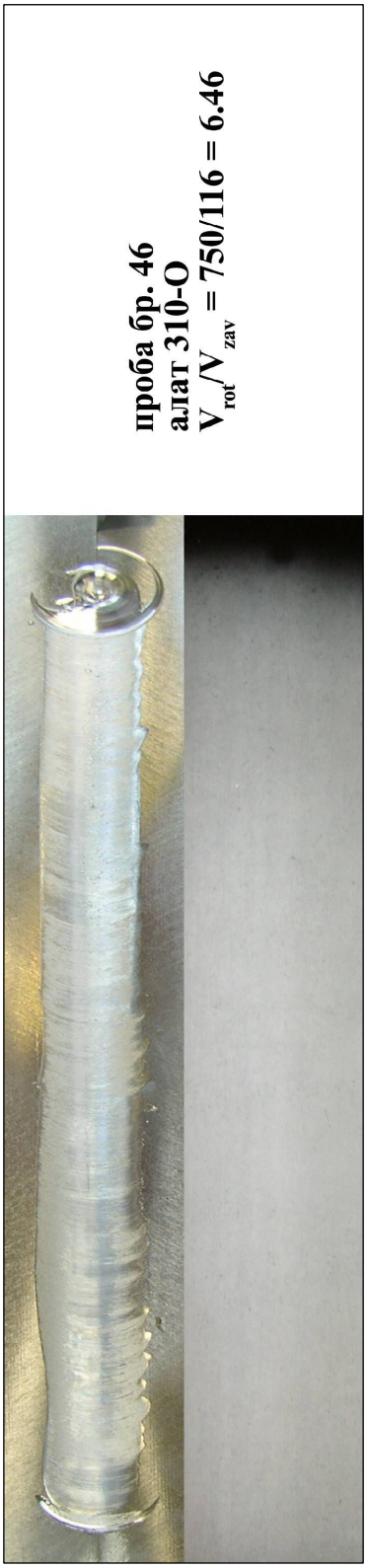


проба бр. 43
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 750/93 = 8.06

проба бр. 44
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 750/73 = 10.27

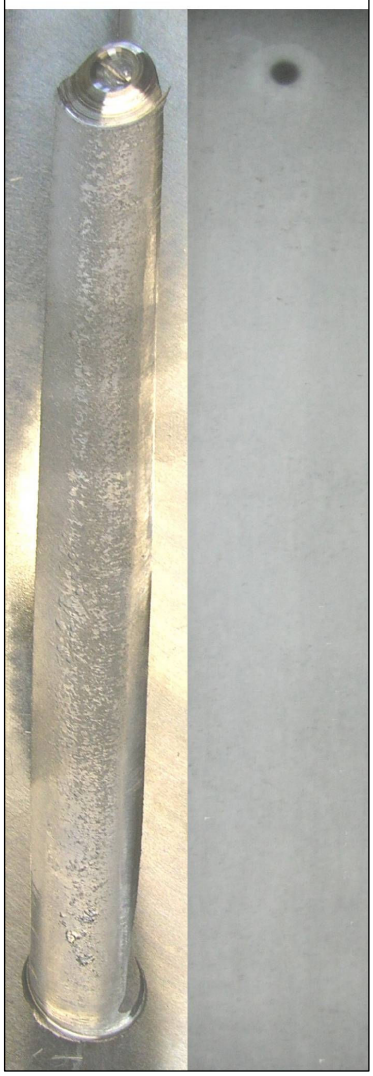


проба бр. 45
алат 310-O
V_{rot}/V_{zav} = 750/150 = 5.00



проба бр. 46
алат 310-O
V_{rot}/V_{zav} = 750/116 = 6.46

проба бр. 47
алат 310-O
V_{rot}/V_{zav} = 750/93 = 8.06



проба бр. 48
алат 310-О
V_{rot}/V_{zav} = 750/73 = 10.27

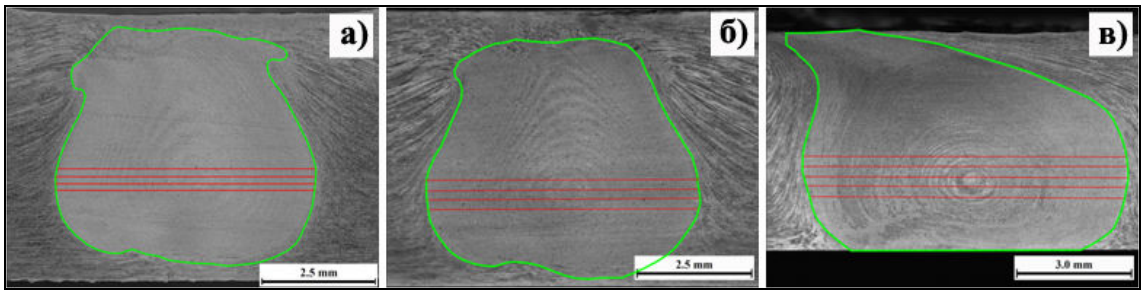
проба бр. 49
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 1180/150 = 7.87

проба бр. 50
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 950/190 = 5.00

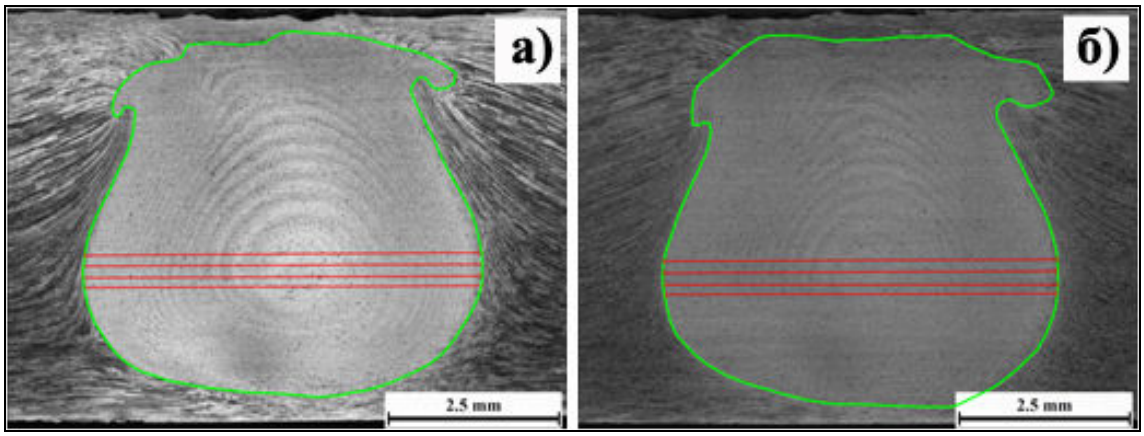
проба бр. 51
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 950/150 = 6.33

проба бр. 52
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 950/116 = 8.19

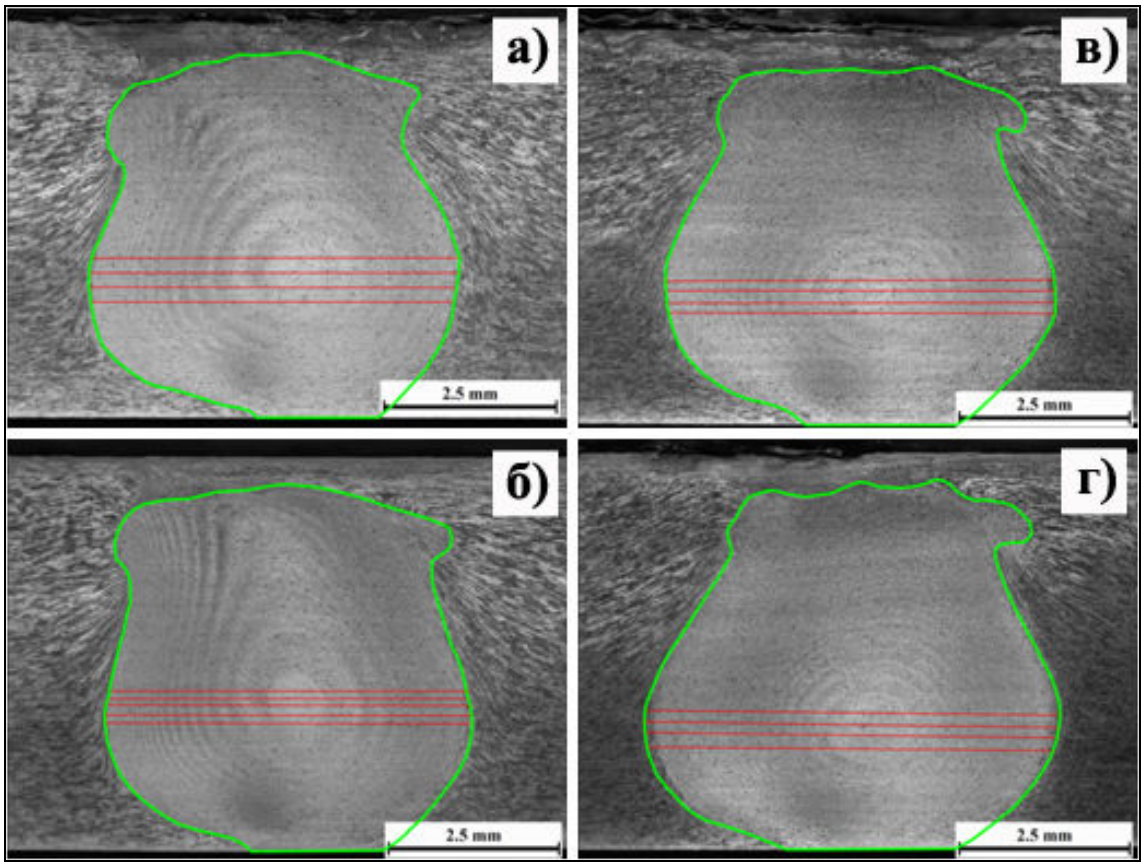
проба бр. 53
алат 310
V_{rot}/V_{zav} = 950/93 = 10.21



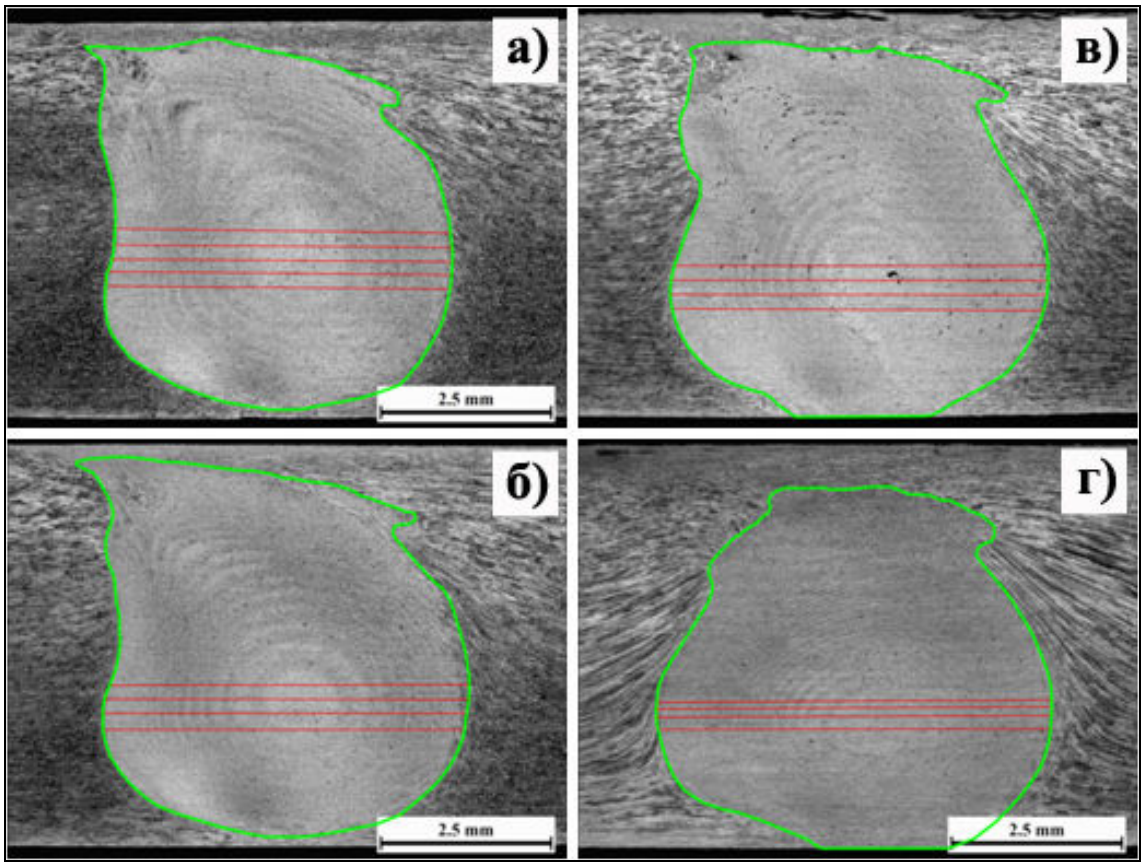
Мерење димензија грумена спојева заварених алатом 310 при V_{rot}=1180 obr/min и различитим брзинама заваривања: **а)** 150 mm/min; **б)** 116 mm/min; **в)** 46 mm/min.



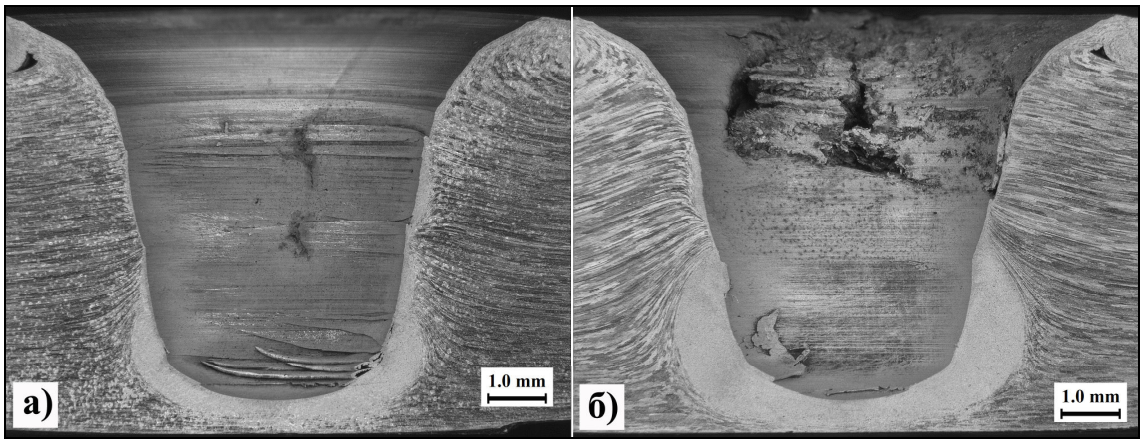
Мерење димензија грумена спојева заварених алатом 310 при V_{rot}=950 obr/min и различитим брзинама заваривања: **а)** 116 mm/min; **б)** 93 mm/min.



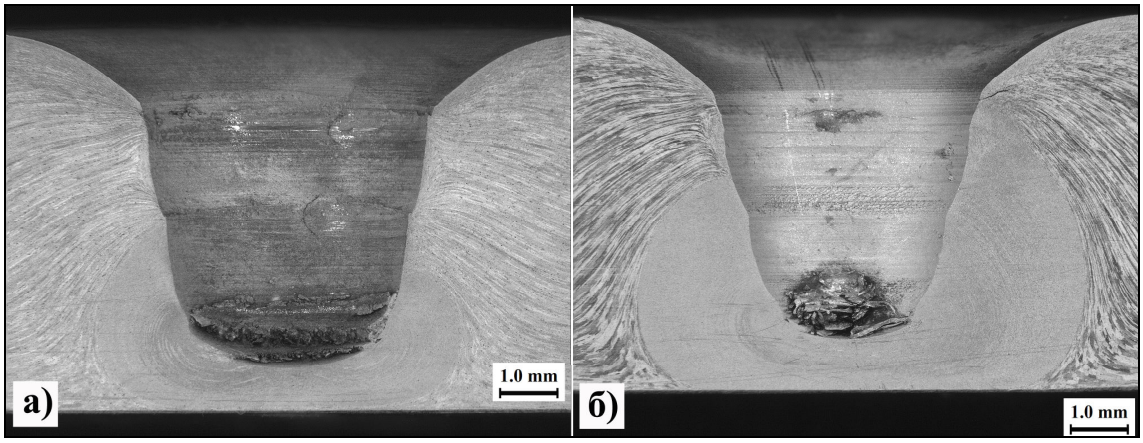
Мерење димензија грумена спојева заварених алатом 310 при V_{rot}=750 obr/min и различитим брзинама заваривања: **а)** 150 mm/min; **б)** 116 mm/min; **в)** 93 mm/min; **г)** 73 mm/min.



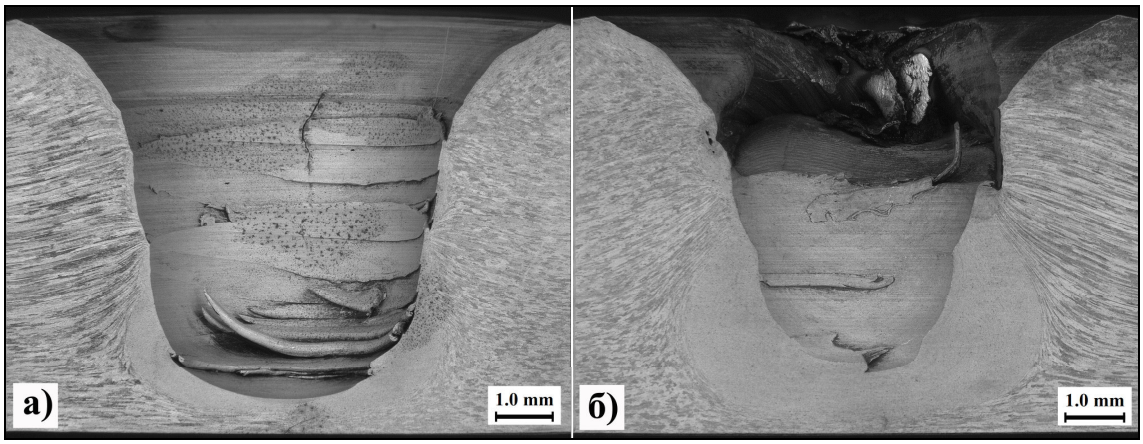
Мерење димензија грумена спојева заварених алатом 310-О при V_{rot}=750 obr/min и различитим брзинама заваривања: **а)** 150 mm/min; **б)** 116 mm/min; **в)** 93 mm/min; **г)** 73 mm/min.



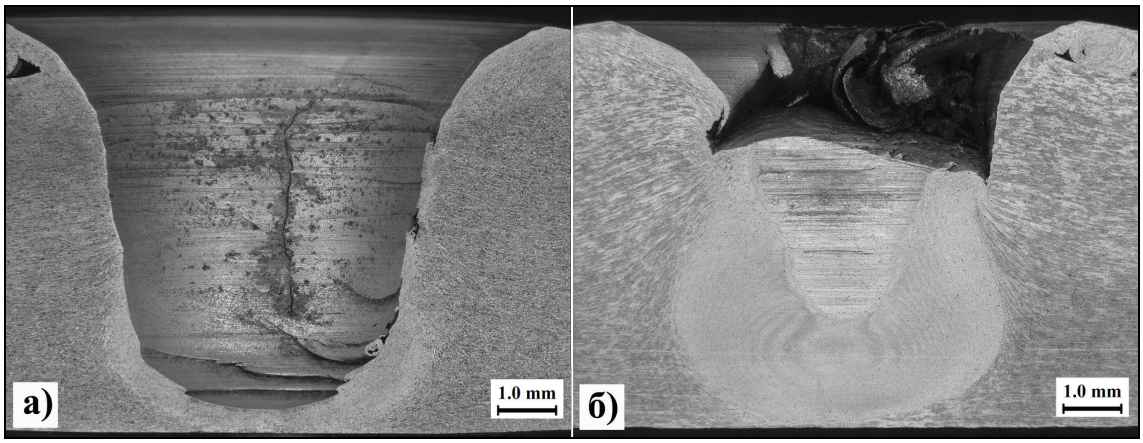
Пресек излазне рупе, гледано у правцу заваривања, споја завареног алатом 310 при V_{rot}=1180 obr/min и V_{zav}=116 mm/min: **а)** фронтална страна; **б)** задња страна.



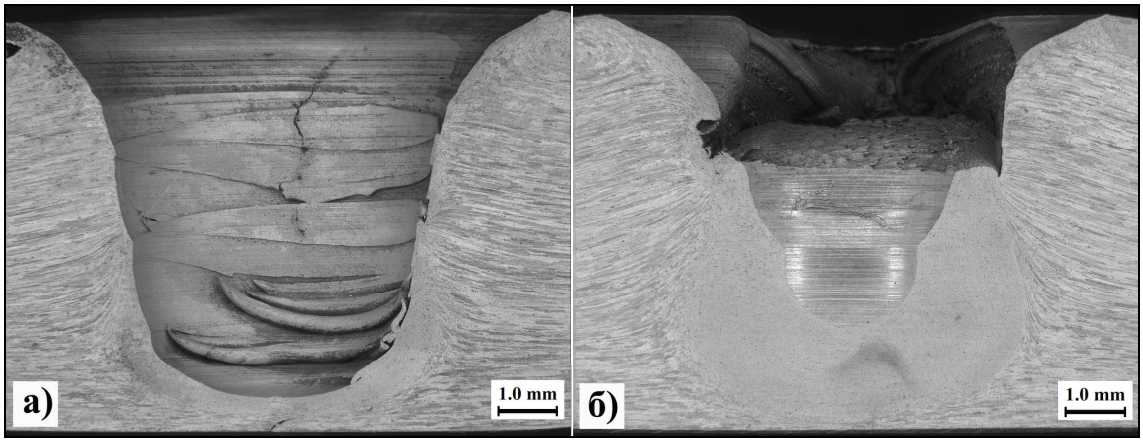
Пресек излазне рупе, гледано у правцу заваривања, споја завареног алатом 310 при V_{rot}=1180 obr/min и V_{zav}=46 mm/min: **а)** фронтална страна; **б)** задња страна.



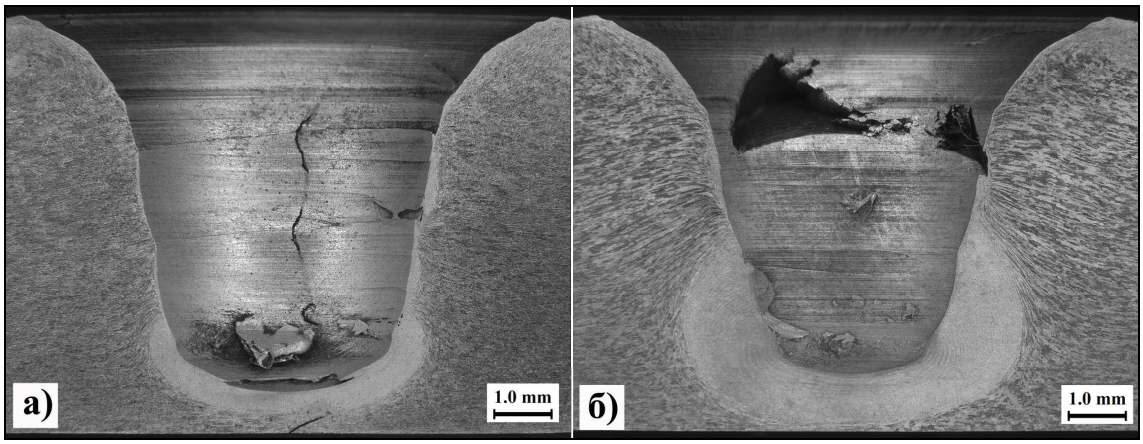
Пресек излазне рупе, гледано у правцу заваривања, споја завареног алатом 310 при V_{rot}=950 obr/min и V_{zav}=93 mm/min: **а)** фронтална страна; **б)** задња страна.



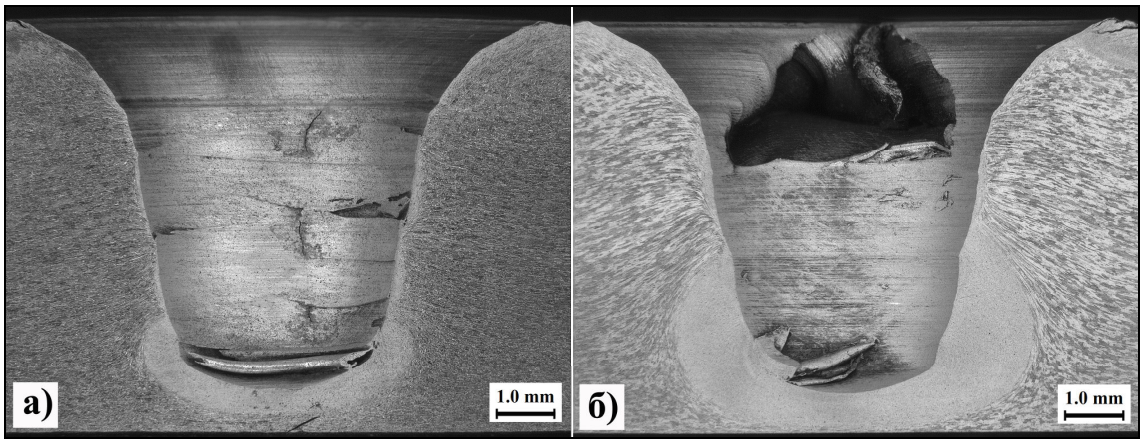
Пресек излазне рупе, гледано у правцу заваривања, споја завареног алатом 310 при V_{rot}=750 obr/min и V_{zav}=150 mm/min: **а)** фронтална страна; **б)** задња страна.



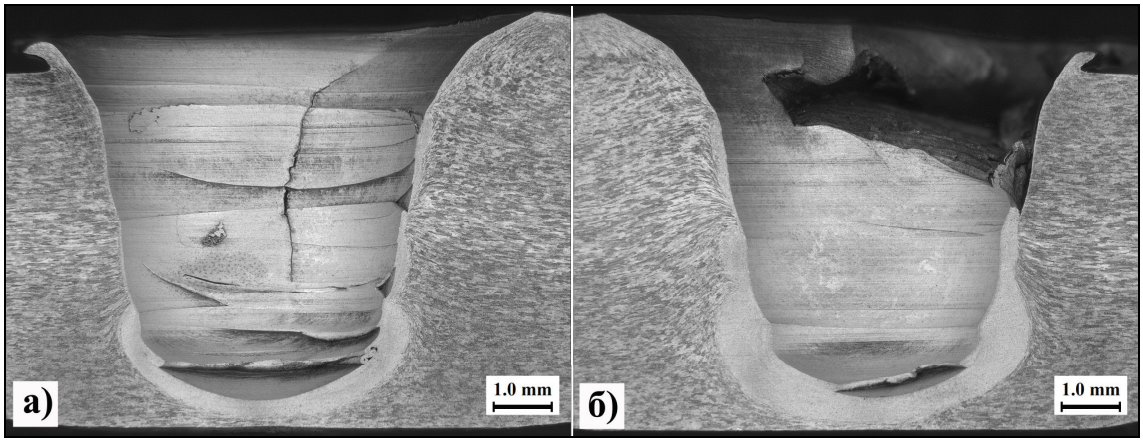
Пресек излазне рупе, гледано у правцу заваривања, споја завареног алатом 310 при V_{rot}=750 obr/min и V_{zav}=116 mm/min: **а)** фронтална страна; **б)** задња страна.



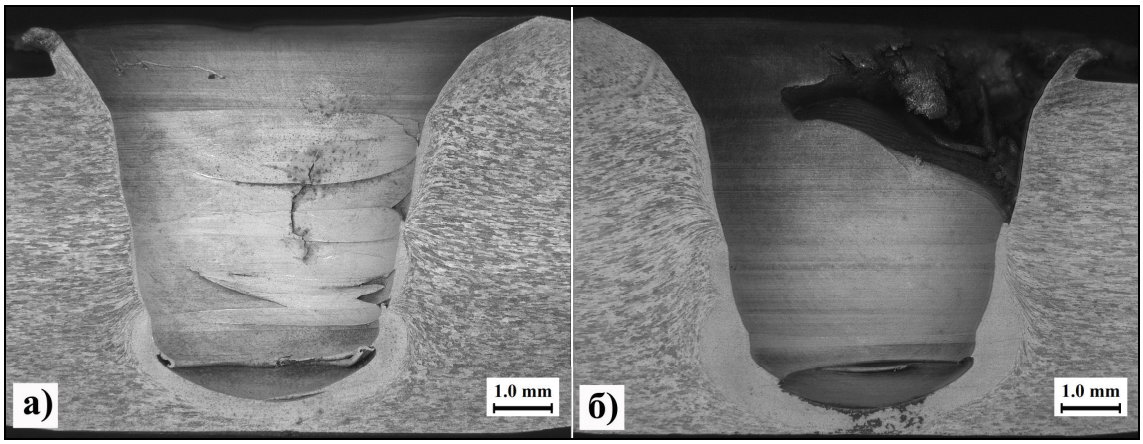
Пресек излазне рупе, гледано у правцу заваривања, споја завареног алатом 310 при V_{rot}=750 obr/min и V_{zav}=93 mm/min: **а)** фронтална страна; **б)** задња страна.



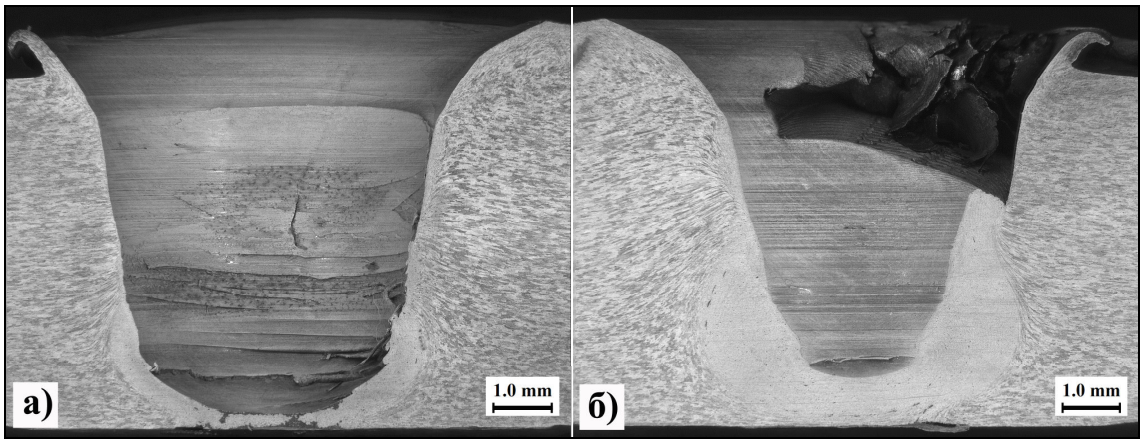
Пресек излазне рупе, гледано у правцу заваривања, споја завареног алатом 310 при V_{rot}=750 obr/min и V_{zav}=73 mm/min: **а)** фронтална страна; **б)** задња страна.



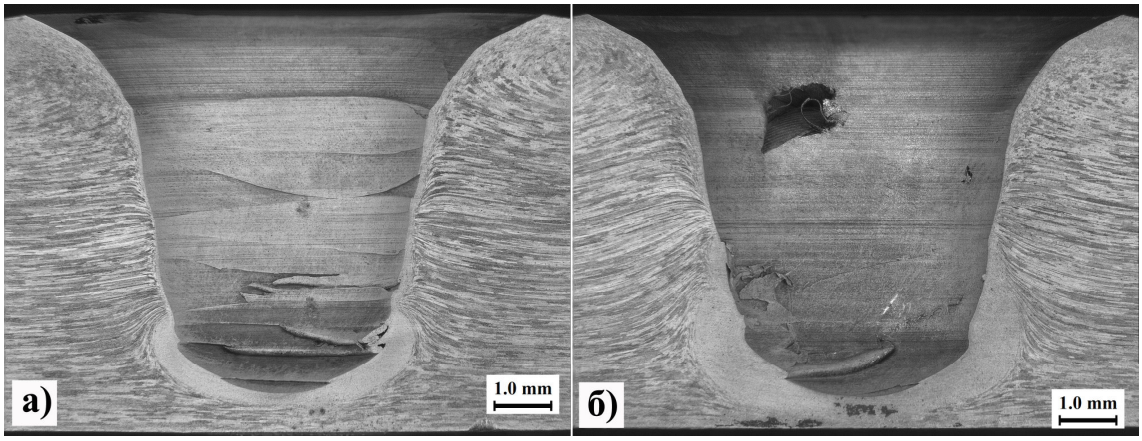
Пресек излазне рупе, гледано у правцу заваривања, споја завареног алатом 310-О при V_{rot}=750 obr/min и V_{zav}=150 mm/min: **а)** фронтална страна; **б)** задња страна.



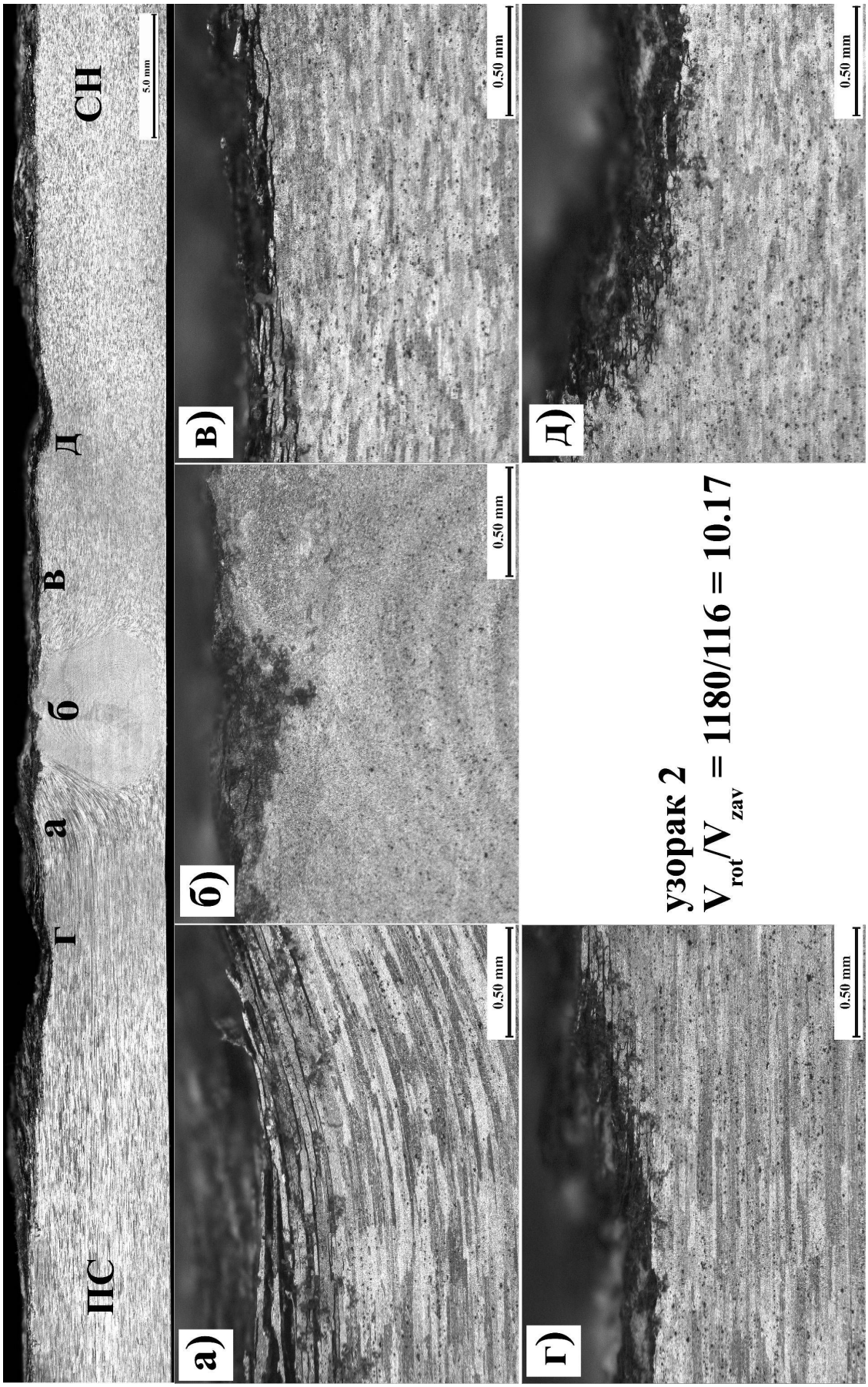
Пресек излазне рупе, гледано у правцу заваривања, споја завареног алатом 310-О при V_{rot}=750 obr/min и V_{zav}=116 mm/min: **а)** фронтална страна; **б)** задња страна.

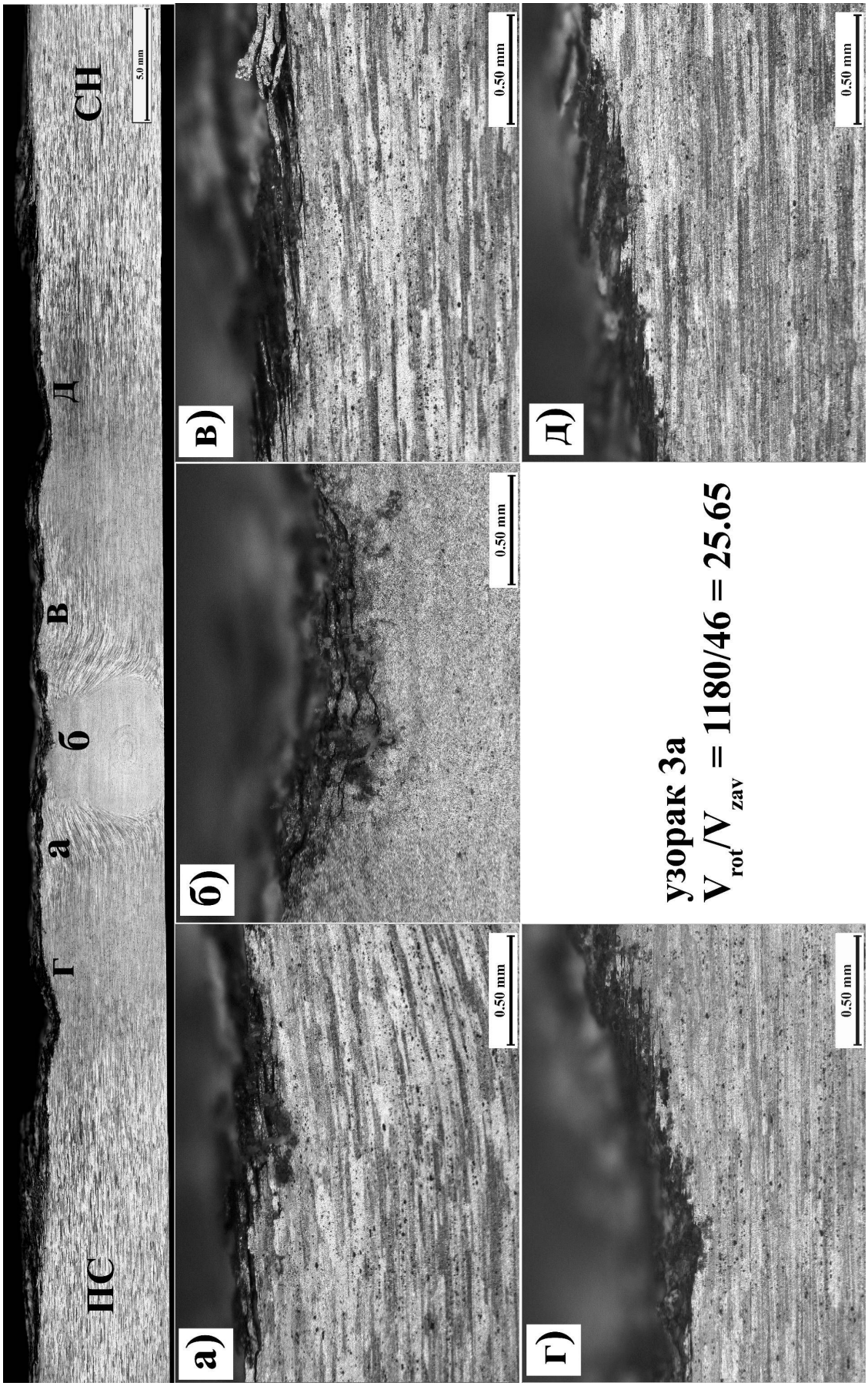


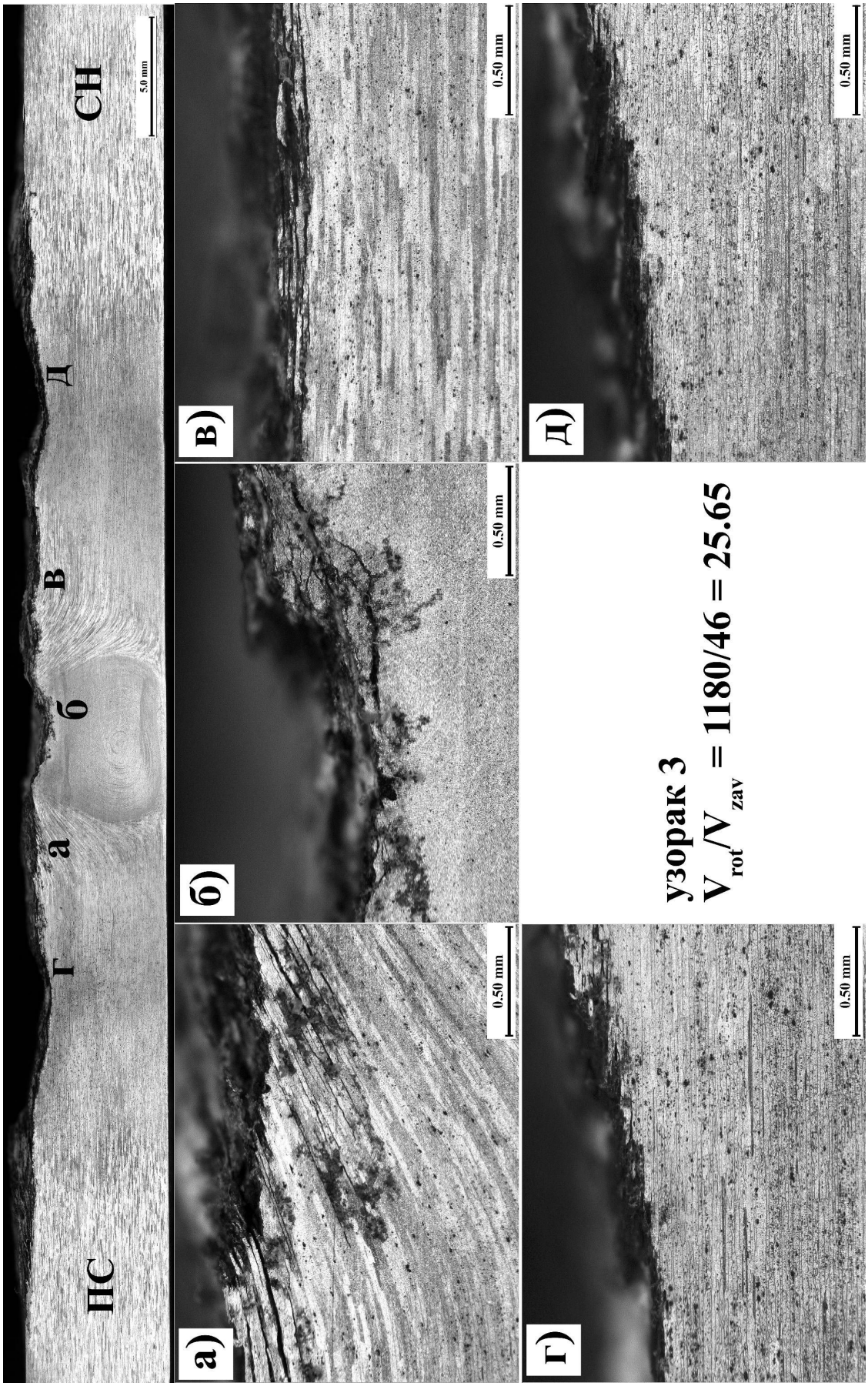
Пресек излазне рупе, гледано у правцу заваривања, споја завареног алатом 310-О при V_{rot}=750 obr/min и V_{zav}=93 mm/min: **а)** фронтална страна; **б)** задња страна.

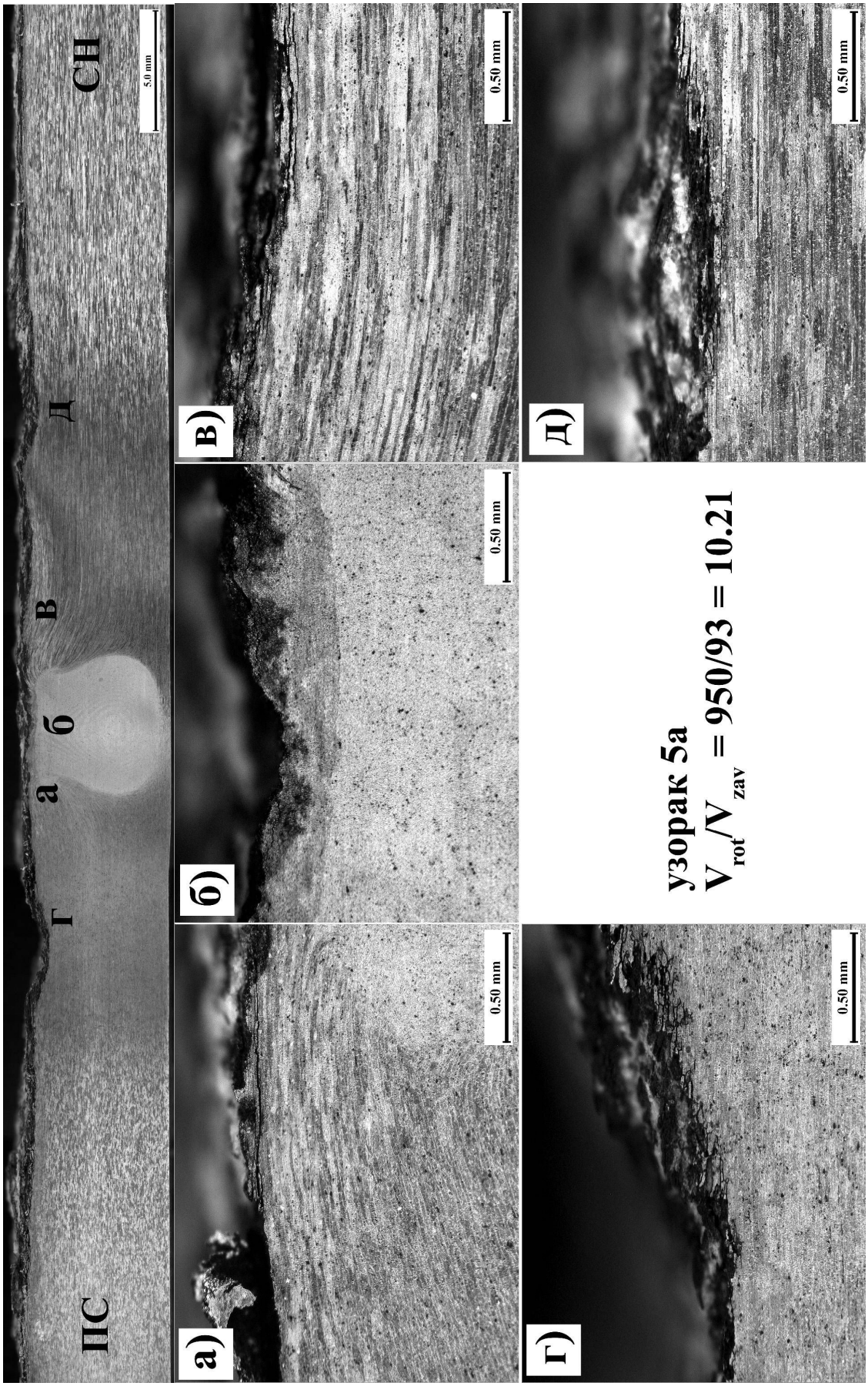


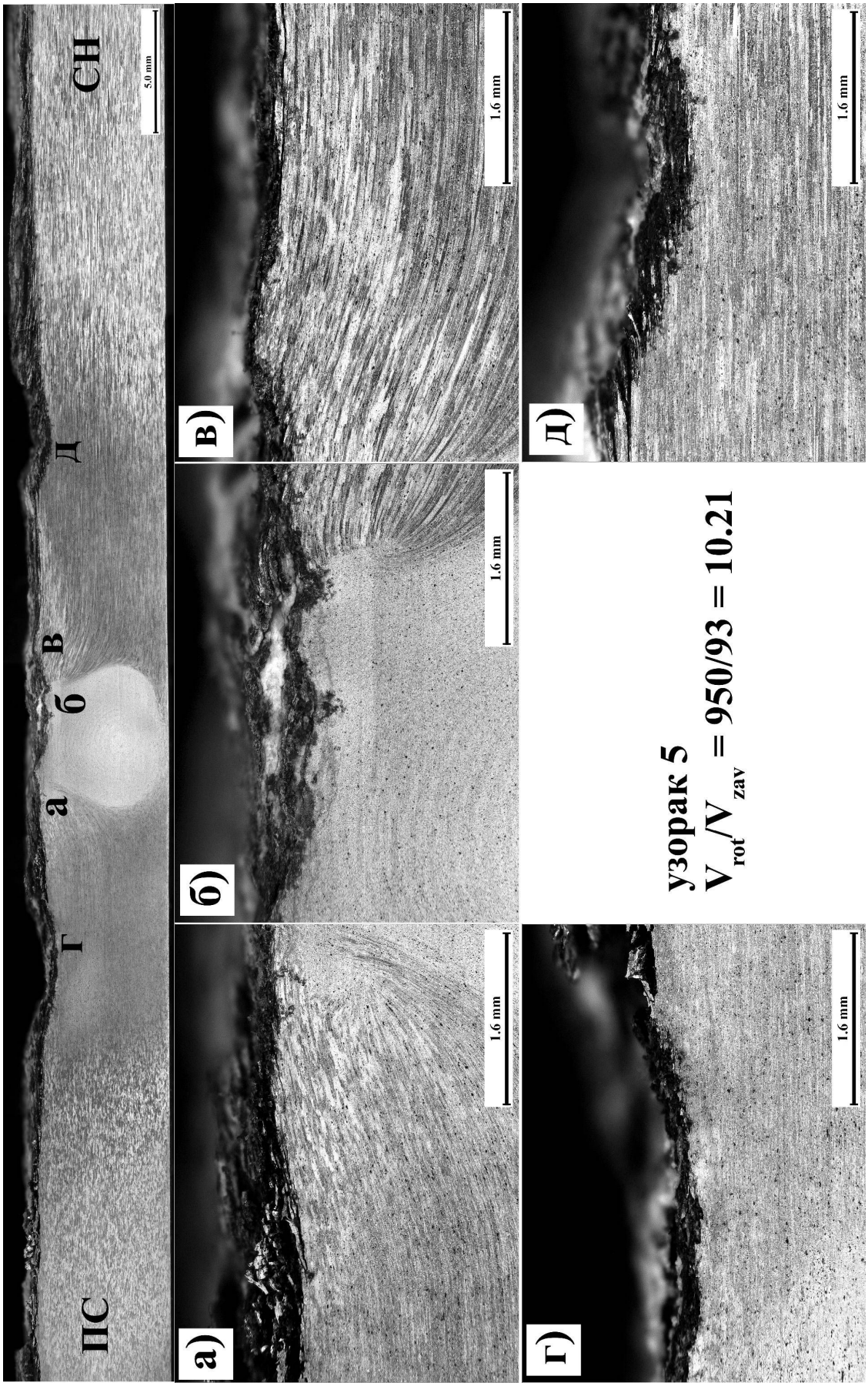
Пресек излазне рупе, гледано у правцу заваривања, споја завареног алатом 310-О при V_{rot}=750 obr/min и V_{zav}=73 mm/min: **а)** фронтална страна; **б)** задња страна.

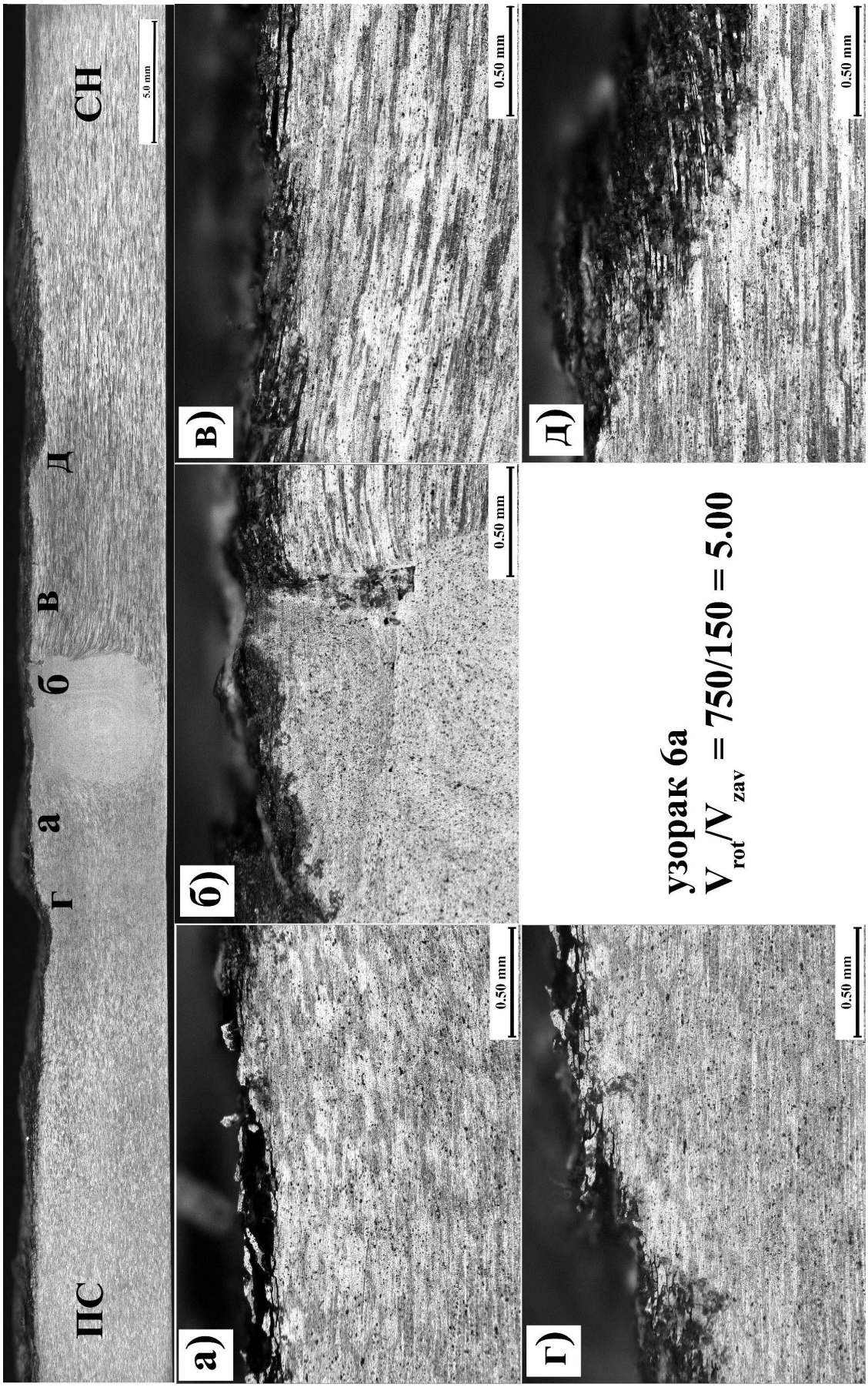

ПС
Г
а
б
в
Д
СН
5.0 mm
а)
0.50 mm
б)
0.50 mm
в)
0.50 mm
г)
0.50 mm
Д)
0.50 mm
узорак 2
V_{rot}/V_{zav} = 1180/116 = 10.17


ПС
Г
а
б
В
Д
СН
5.0 mm
а)
0.50 mm
б)
0.50 mm
в)
0.50 mm
г)
0.50 mm
Д)
0.50 mm
узорак 3а
V_{rot}/V_{zav} = 1180/46 = 25.65


ПС
Г
а
б
В
Д
СН
5.0 mm
а)
0.50 mm
б)
0.50 mm
в)
0.50 mm
г)
0.50 mm
Д)
0.50 mm
узорак 3
V_{rot}/V_{zav} = 1180/46 = 25.65

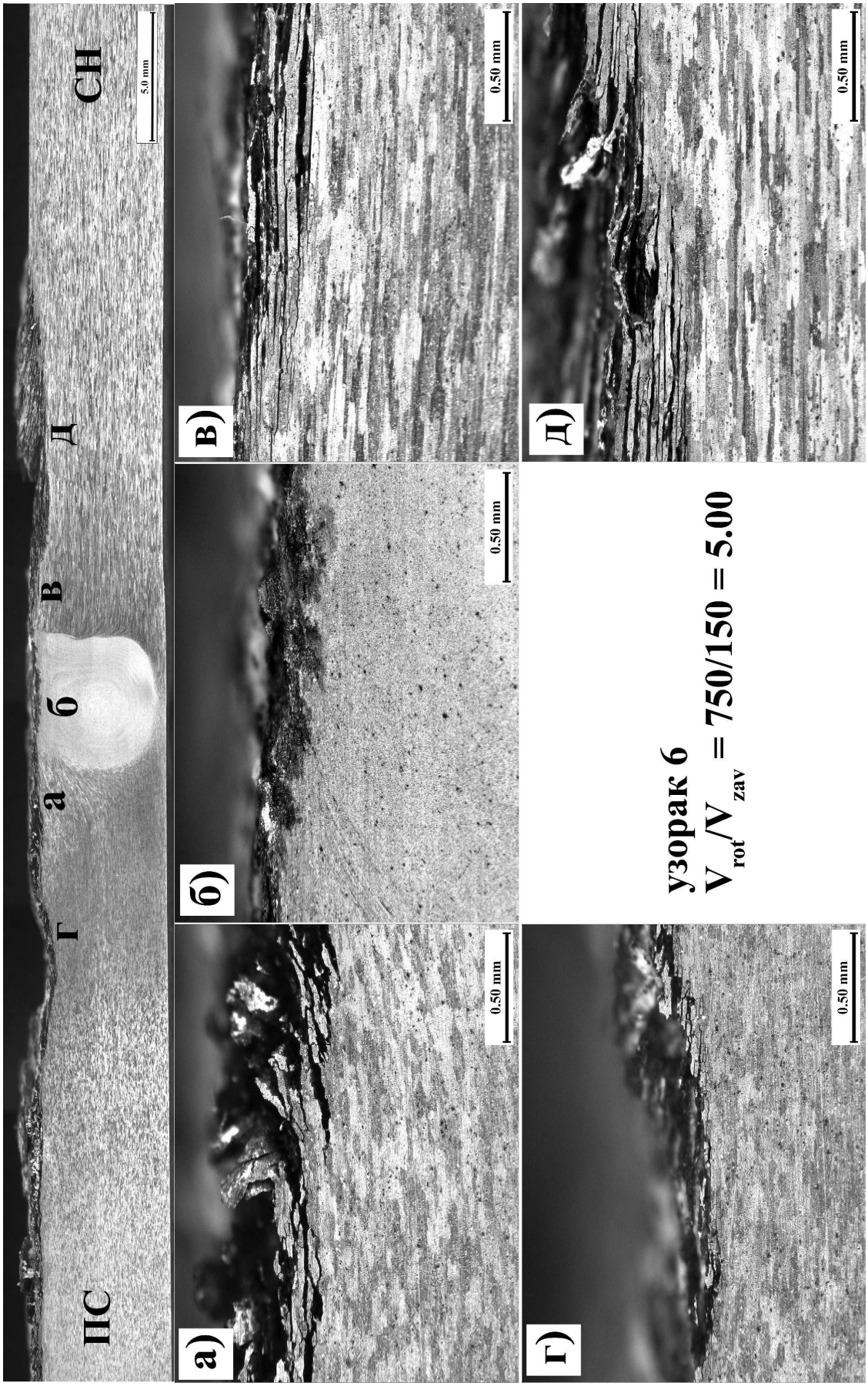

ПС
Г а б в Д
СН
5.0 mm
а)
0.50 mm
б)
0.50 mm
в)
0.50 mm
г)
0.50 mm
Д)
0.50 mm
узорак 5а
V_{rot}/V_{zav} = 950/93 = 10.21

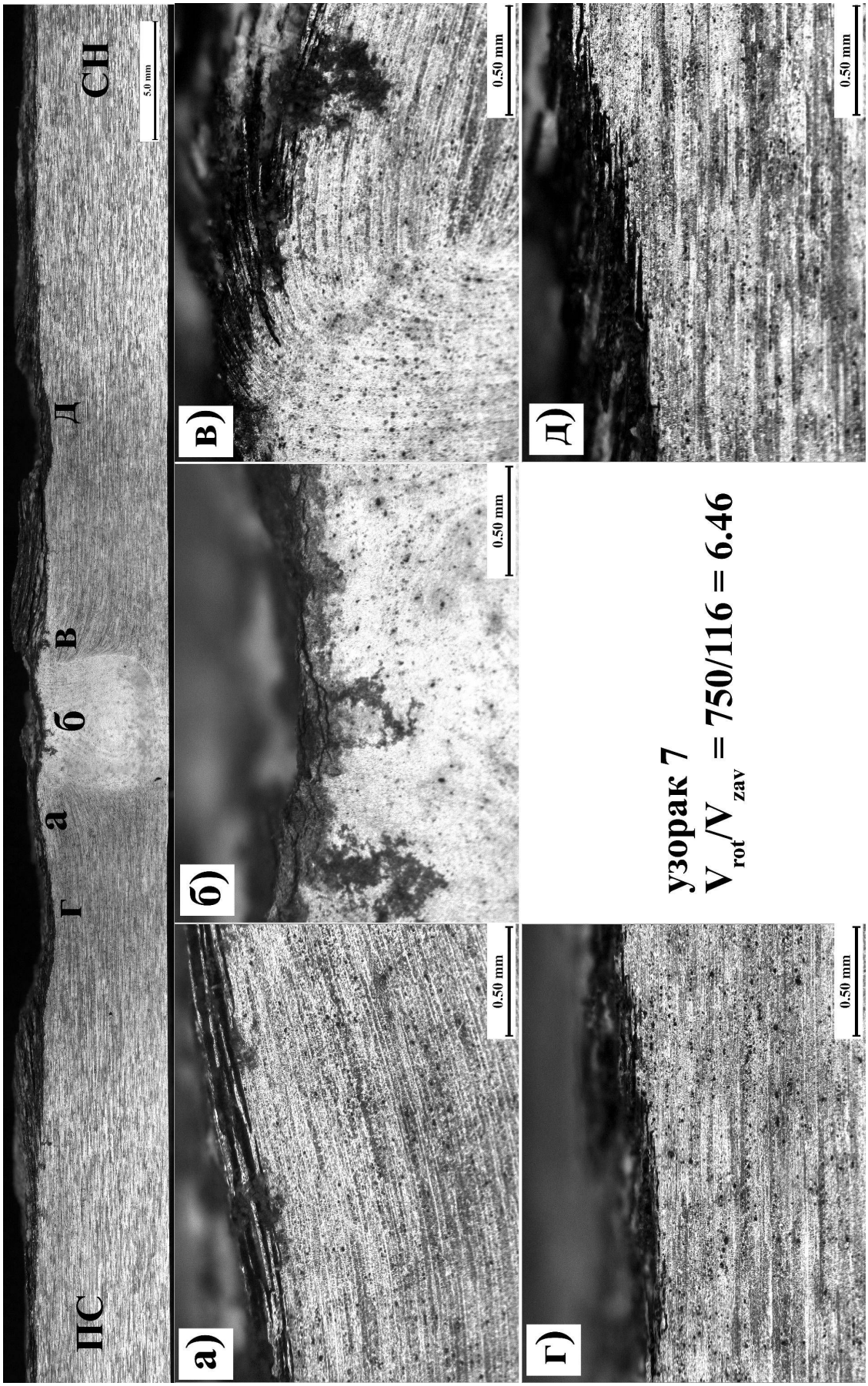

ПС
Г
а
б
в
Д
СН
5.0 mm
а)
1.6 mm
б)
1.6 mm
в)
1.6 mm
г)
1.6 mm
Д)
1.6 mm
узорак 5
V_{rot}/V_{zav} = 950/93 = 10.21



узорак 6а

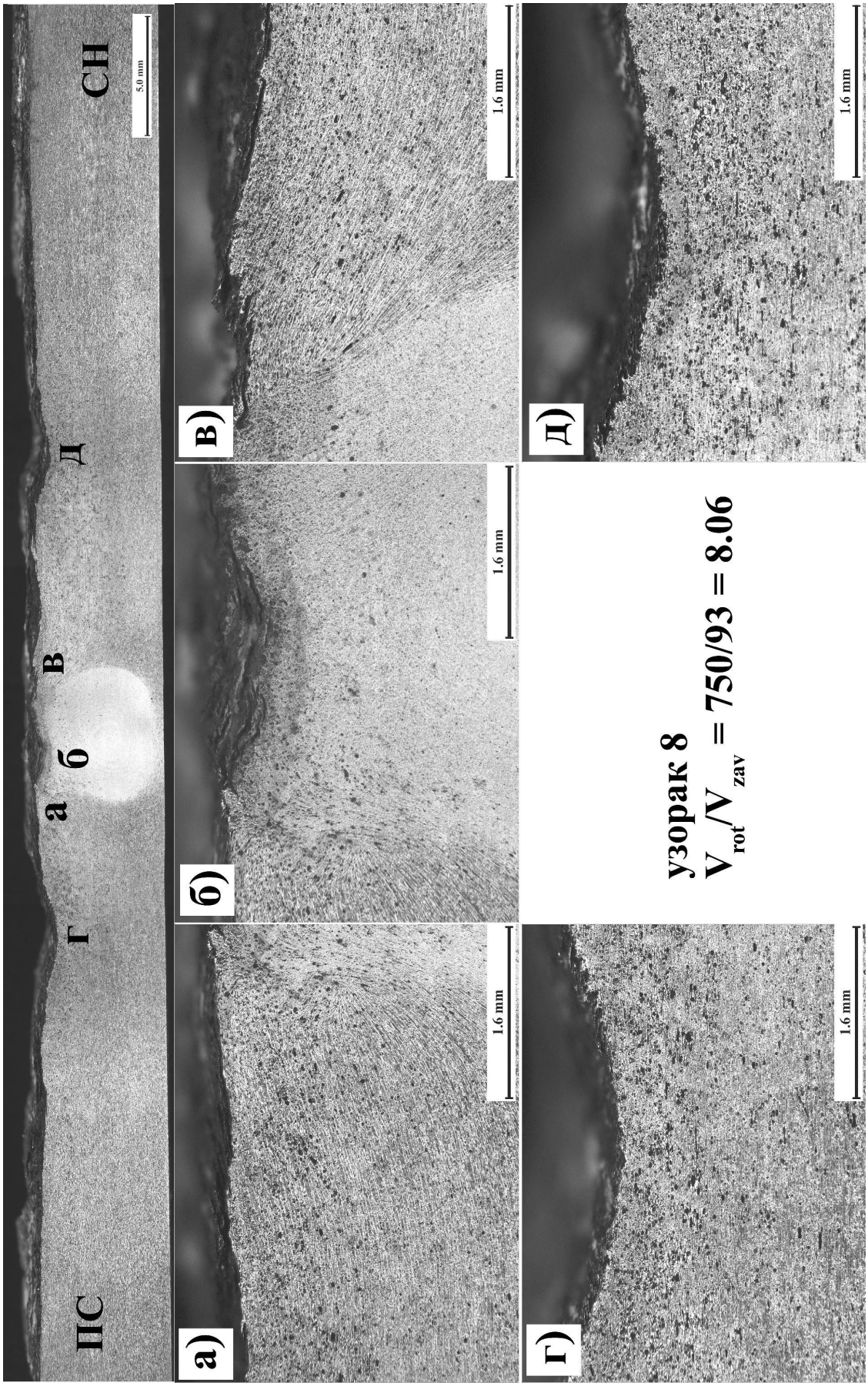
$$V_{rot}/V_{zav} = 750/150 = 5.00$$

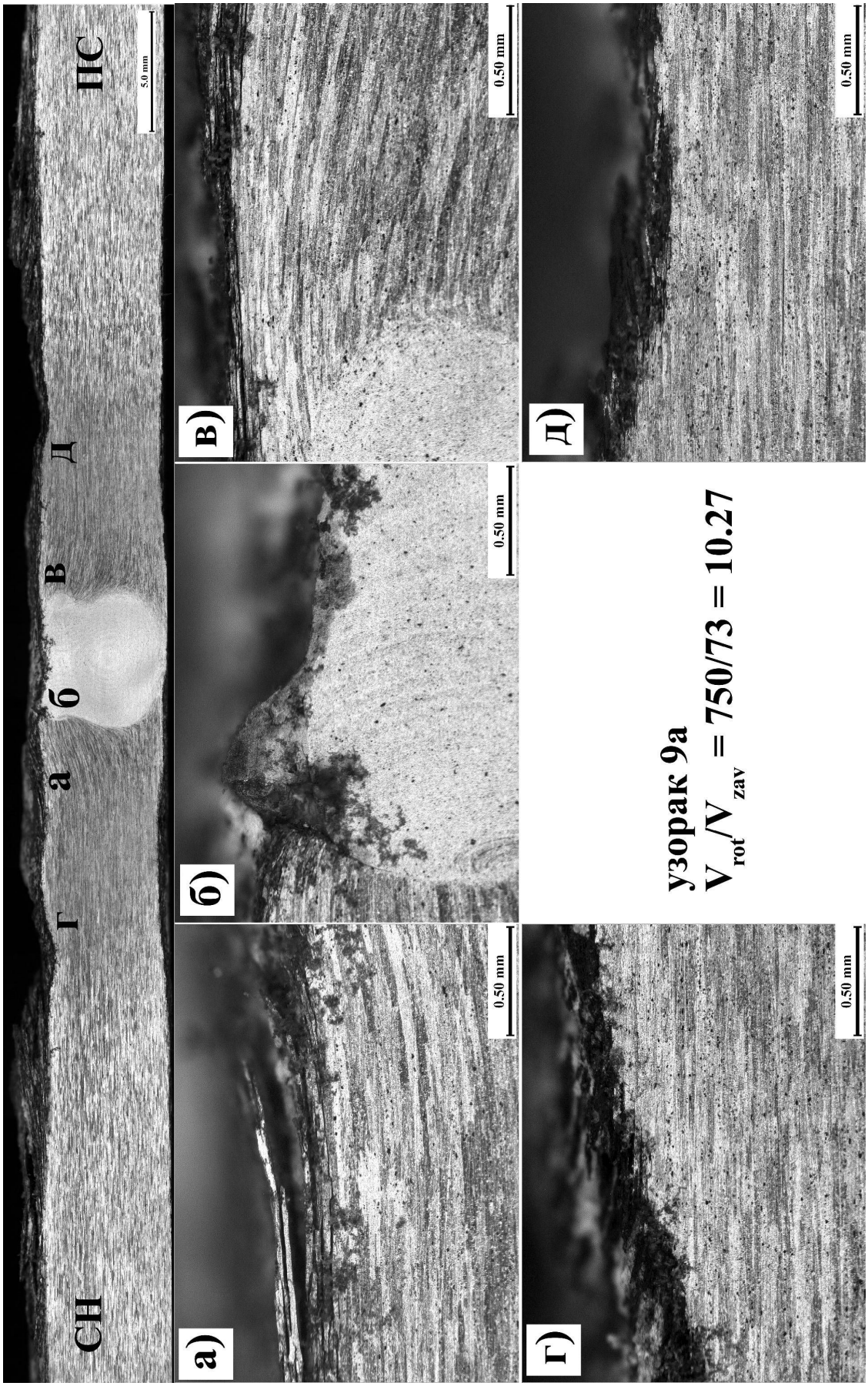

ПС
Г
а
б
В
Д
СН
5.0 mm
а)
0.50 mm
б)
0.50 mm
в)
0.50 mm
г)
0.50 mm
д)
0.50 mm
узорак 6
V_{rot}/V_{zav} = 750/150 = 5.00



узорак 7

$$V_{rot}/V_{zav} = 750/116 = 6.46$$


ПС
Г
а
б
В
Д
СН
5.0 mm
а)
1.6 mm
б)
1.6 mm
в)
1.6 mm
г)
1.6 mm
Д)
1.6 mm
узорак 8
V_{rot}/V_{zav} = 750/93 = 8.06



узорак 9а

$$V_{rot}/V_{zav} = 750/73 = 10.27$$

Игор Радисављевић, дипл.инж. металургије, рођен је 26.09.1974. године у Књажевцу. Основну и средњу школу завршио је у Београду. Дипломирао је на ТМФ-у у Београду на Одсеку за металургију и металне материјале одбраном дипломског рада под насловом „Модификација површине одливака Al-Si легура млазом плазме“. Докторске академске студије трећег степена уписао је 2008. године. Ради у Одељењу за металне материјале, Сектора за материјале и заштиту Војнотехничког института као виши истраживач. Бави се истраживањима у области металургије и инжењерства металних материјала. Стручно и научно се исказао у подручју заваривања и заварљивости челика и легура алуминијума, као и у развоју поступка заваривања трењем алатом – FSW. Непосредно је одговоран за спровођење истраживачких активности на подручју оклопне заштите борбених возила. Влада великим бројем метода за испитивање и карактеризацију металних материјала. За остварене резултате похваљен је 2009. године од стране Директора ВТИ-а. Константно је ангажован на реализацији задатка „Истраживање у области металургије и инжењерства металних материјала за НВО“ и на другим развојним и функционалним задацима из надлежности ВТИ-а. У периоду 2008.-2010. год. учествовао је на пројекту Министарства науке и технолошког развоја ТР 19050 „Освајање производње компоненти конструкција поступком заваривања трењем алатом“. У текућем пројектном циклусу ангажован је на пројекту ТР 34018 – „Развој технологије производње и заваривања Al-Mg легуре високе чврстоће за примену у конструкцијама друмских и железничких транспортних средстава“. Аутор и коаутор је 19 стручних радова и 3 техничка решења из области металургије, инжењерства материјала, наоружања и војне опреме са укупном вредношћу начних резултата од 64,7 бодова (4 рада М21, 1 рад М22, 1 рад М23, 1 рад М24, 1 рад М51, 6 радова М33, 1 рад М31, 3 рада М63, 1 рад М64 и 3 рада М84). Аутор је и коаутор 1 елабората, 1 техничке студије и 14 техничких извештаја заведених у документацији ВТИ-а. Одлуком Научног већа ВТИ-а, 27.09.2010 године изабран је у научно звање истраживач-сарадник за област-грану-дисциплину метални материјали. Активни је официр Војске Србије и члан друштва за унапређење заваривања у Србији.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Потписани-а Радисављевић Игор

број индекса ДС-4038/2008

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА ЗАВАРИВАЊА НА СВОЈСТВА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА ДОБИЈЕНИХ ПОСТУПКОМ ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ АЛАТОМ

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 29.05.2014.

Радисављевић Игор

Прилог 2.

Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора	Игор Радисављевић
Број индекса	ДС-4038/2008
Студијски програм	Металуршко инжењерство
Наслов рада	УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА ЗАВАРИВАЊА НА СВОЈСТВА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА ДОБИЈЕНИХ ПОСТУПКОМ ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ АЛАТОМ
Ментор	др Ненад Радовић, ванредни професор, Технолошко-металуршки факултет, Универзитет у Београду

Потписани/а РАДИСАВЉЕВИЋ ИГОР

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис докторанда

У Београду, 29.05.2014.

Радисављевић Игор

Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

УТИЦАЈ ПАРАМЕТАРА ЗАВАРИВАЊА НА СВОЈСТВА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА АЛУМИНИЈУМСКИХ ЛЕГУРА ДОБИЈЕНИХ ПОСТУПКОМ ЗАВАРИВАЊА ТРЕЊЕМ АЛАТОМ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

Потпис докторанда

У Београду, 29.05.2014.

Радисављевић Иван