

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Ді Цзян

УДК: 621.791.75

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗВАРЮВАННЯ ТЕРТЯМ
НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ З'ЄДНАНЬ МАТЕРІАЛІВ НА
ОСНОВІ АЛЮМІНІЮ**

Спеціальність 132 – Матеріалознавство

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Ді Цзян

Jiang Di
9/25/2025

Наукові керівники:

Колупаєв Ігор Миколайович,

Кандидат фізико-математичних наук, доцент
кафедри матеріалознавства

НТУ «ХПІ»,

Субботіна Валерія Валеріївна,

доктор технічних наук,

завідувач кафедри матеріалознавства

НТУ «ХПІ»

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Цзян Ді. Вплив технологічних параметрів контактного точкового зварювання тертям з перемішуванням на механічні властивості з'єднань матеріалів на основі алюмінію - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) зі спеціальності 132 – Матеріалознавство (13 – Механічна інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2025.

Дисертаційна робота присвячена вивченню поведінки деформації матеріалу і механізму пластичної течії в процесі зварювання, а також впливу параметрів процесу на мікроструктуру і механічні властивості зварних з'єднань.

Дисертаційна робота виконана у Хуаншаньському університеті, Китай (Huangshan University, China) та на кафедрі «Матеріалознавство» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Мета дисертаційної роботи – встановити закономірності впливу технологічних параметрів (швидкості обертання, швидкості зварювання, діаметра інструменту) на якість зварних з'єднань алюмінієвих сплавів при точковому зварюванні тертям з перемішуванням із заповненням для оптимізації процесу та забезпечення високих механічних властивостей.

Об'єкт дослідження: процес утворення зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 6061-T6, отриманих методом точкового зварювання тертям з перемішуванням із заповненням

Предмет дослідження: закономірності впливу технологічних параметрів (діаметра перемішувального інструменту, швидкості обертання та швидкості зварювання) на мікроструктуру, механічні властивості та механізми формування з'єднань алюмінієвого сплаву 6061-T6.

У вступі дисертації обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету та визначено основні завдання дослідження, окреслено об'єкт і предмет роботи. Наведено перелік методів, використаних у процесі дослідження. Підкреслено наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів. Відображено особистий внесок здобувача, подано відомості щодо апробації результатів дослідження та публікацій, у яких висвітлено основні положення дисертаційної роботи.

Перший розділ дисертації присвячений аналізу джерел інформації щодо впливу технологічних параметрів зварювання тертям на механічні властивості з'єднань матеріалів на основі алюмінію. Показано, що сучасні дослідження і випробування спрямовані на удосконалення процесу зварювання шляхом розробки нових механізмів взаємодії матеріалів у зоні з'єднання. На основі аналізу літературних джерел сформульовано завдання дослідження.

У другому розділі наведений перелік вихідних матеріалів, експериментального обладнання і викладено опис методик дослідження.

У третьому розділі наведено і проаналізовано теоретичну модель тепловиділення в зоні точкового зварювання тертям з перемішуванням із заповненням (ТЗТЗП) і металографічну структуру при різних параметрах процесу. Показано, що у зоні точкового зварювання швидкість введення інструмента є основним фактором, що впливає на тепловиділення, за нею йде швидкість обертання, а потім діаметр інструменту. Також показано, що при різних параметрах процесу і діаметрах інструменту морфологія поверхні в області ТЗТЗП значно змінюється, в основному, внаслідок теплового впливу і тангенціальної швидкості металу, які взаємно обмежені.

У четвертому розділі проведено дослідження характеристик з'єднань, отриманих методом повторного тертєвого точкового зварювання з перемішуванням, з акцентом на зсувну міцність, мікротвердість і втому при навантаженні. Показано, що діаметр перемішувального інструмента впливає на максимальну зсувну міцність у зоні точкового зварювання. У зоні ТЗТЗП з'єднання, які утворені інструментами меншого діаметра, схильні до

руйнування по поверхні з'єднання або до виривання виступу, тоді як при більшому діаметрі інструмента зазвичай спостерігається часткове руйнування виступу. Зона ТЗТЗП зазнає рекристалізаційного відпалу, внаслідок чого її мікротвердість нижча за твердість основного матеріалу. Найвища твердість на поверхні спостерігається в зоні активного зрушення, найнижча - в зоні термічного впливу. Кількість циклів до втомного руйнування у зонах ТЗТЗП зростає зі збільшенням діаметра інструмента.

У *п'ятому розділі* на основі експериментальних даних, отриманих у попередніх розділах, було виконано математичний аналіз ТЗТЗП за допомогою програмного забезпечення Deform, вибрано репрезентативні параметри процесу як основні об'єкти дослідження, і в результаті отримано температурне поле та внутрішнє переміщення металу в зоні точкового зварювання. Побудовано, у програмі Deform V11.0, математичну модель рефілінгового точкового зварювання методом тертя з перемішуванням (ТЗТЗП) з використанням різних змішувальних інструментів. Отримано важливу інформацію про напружене поле, температурне поле, поле швидкостей, відстеження частинок і деформацію сітки на різних стадіях зварювання. Симуляції при математичному моделюванні показали, що збільшення діаметра змішувального інструмента суттєво впливає на температурне поле в зоні точкового зварювання. Результати моделювання показали, що для інструментів з меншим діаметром просторові гвинтоподібні траєкторії є більш вираженими та слабшають зі збільшенням відстані від центру зварного шва.

У *шостому розділі* за допомогою методу миттєвої зупинки були отримані макро- та мікроструктури ТЗТЗП на різних стадіях, а також визначено текучість металу в зоні точкового зварювання шляхом поєднання результатів аналізу полів напружень та температур, отриманих методом математичного моделювання. В результаті було встановлено механізм формування зони ТЗТЗП для різних діаметрів змішувальних інструментів. Течія металу в зоні точкового зварювання в основному має характер вертикального спірального руху. Проведено комплексні експериментальні роботи з ТЗТЗП товстих

пластин із алюмінієвого сплаву 6061-Т6 (товщина 3 мм). Основна увага зосереджена на змішувальному інструменті, зокрема досліджено вплив п'яти різних діаметрів стрижня на формування зони точкового зварювання. Дослідження виконано для різних швидкостей обертання та зварювання, з аналізом макро- і мікроструктури, мікротвердості, міцності на розтяг і зсув, втомних властивостей, а також динамічних змін напружень і деформацій. Крім того, побудовано математичну модель у програмі Deform V11.0, що дало змогу отримати дані про поля напружень, температури, швидкостей, траєкторії частинок і деформацію сітки на різних стадіях зварювання. Отримані результати дозволили пояснити механізм формування ТЗТЗП. Наведено основні результати дисертаційної роботи при розв'язанні поставлених завдань.

У висновках представлено основні результати наукової роботи щодо вирішення поставлених наукових завдань дослідження.

За результатами дослідження отримано наступні наукові результати:

Вперше:

1. Системно досліджено з удосконаленням п'ять типів перемішувачів інструментів діаметром 6-10 мм та встановлено оптимальні технологічні параметри для бездефектного зварювання алюмінієвого сплаву 6061-Т6 товщиною 3 мм.

2. Встановлено закономірності формування характерного "U"-подібного профілю поперечного перерізу зварного шва з розмірами, що дещо перевищують розміри інструменту, та виявлено три основні зони: зону впливу стрижня, зону впливу гільзи та зону термомеханічного впливу.

3. Визначено критичну роль "зони зчеплення при фрикційному заклепуванні з перемішуванням" у забезпеченні експлуатаційних характеристик зварного шва та встановлено кореляцію між розміром зерна та положенням зони.

4. Встановлено пряму залежність між діаметром інструменту та рівнем сили розтягуючого зсуву: 9,27; 13,74; 14,79; 16,83 та 18,16 кН для

діаметрів 6-10 мм відповідно, що підтверджує діаметр інструменту як ключовий фактор міцності з'єднання.

5. Розроблено математичну модель на базі Deform V11.0, що описує процес точкового зварювання тертям з перемішуванням та дозволяє прогнозувати температурні поля, напруження та характер течії металу в зоні зварювання.

6. Встановлено два механізми формування з'єднань залежно від діаметра інструменту: "тертя зсуву - обертання на місці" для малих діаметрів та "двосторонній зсув - центральний осьовий потік" для великих діаметрів.

Завдання дослідження: Розробити та виготовити перемішуючі інструменти різних діаметрів для точкового зварювання тертям з перемішуванням товстих алюмінієвих плит.

1. Встановити вплив технологічних параметрів на формування мікроструктури та зонального розподілу в зварних з'єднаннях.

2. Дослідити механічні властивості з'єднань та визначити оптимальні режими зварювання.

3. Розробити математичну модель процесу точкового зварювання тертям з перемішуванням для прогнозування якості з'єднань.

4. Встановити механізми формування з'єднань при різних діаметрах інструменту.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Встановлено критерії вибору діаметра інструменту залежно від вимог до міцності з'єднання: менші діаметри призводять до руйнування по межі розділу, більші – до часткового руйнування зони перемішування.

2. Створено методологію прогнозування механічних властивостей з'єднань на основі математичного моделювання процесу.

3. Результати впроваджені в навчальний процес НТУ "ХПІ" та можуть бути використані в автомобільній, залізничній та аерокосмічній промисловості.

4. Розробити та виготовити перемішуючі інструменти різних діаметрів

для точкового зварювання тертям з перемішуванням товстих алюмінієвих плит.

5. Розроблено технологічні рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів точкового зварювання тертям з перемішуванням для промислового застосування при з'єднанні товстих алюмінієвих плит.

Ключові слова: алюмінієві листи, точкове зварювання тертям з перемішуванням (ТЗТЗП), мікроструктура, механічні властивості, комплексна оцінка експлуатаційних характеристик, рекристалізація, твердість, деформація, структура, металографічний аналіз, конструкція, моделювання, мідь, технологічний процес, зносотійкість, технологія, метод, мікротвердість, мікроструктура, сталь.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Xiaole Ge, Igor Kolupaev, Weiwei Song, Di Jiang, Jiafei Pu, Hongfeng Wang, Yuan Chu. Influence of the process parameters on the microhardness and the wear resistance of the friction stir processed h65 copper alloy, Journal of Engineering and Technological Sciences, 2022, 54(6), 1143-1159.
<https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.6.4> (Scopus)

2. Di Jiang, I. N. Kolupaev, HongFeng Wang & Xiaole Ge. Analysis of mechanical properties of 6010 aluminum alloy without Tool Tilt Angle friction stir welding[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2023,37(13), 2010-2024.
<https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2109254> (Scopus)

3. Di Jiang, I. N. Kolupaev, HongFeng Wang, Xiaole Ge & Liu Hui. Study on the Performance of FSW Joint Welded of Aluminum Alloy by S-Type Track [J], Integrated Ferroelectrics, 2023,234(1), 115-125.
<https://doi.org/10.1080/10584587.2023.2191556> (Scopus)

4. Xiaole Ge, I.N. Kolupaev, Di Jiang, Hongfeng Wang, Shouzhen Cao, Shengrong Liu. Effect of the tool rotation direction on the joint properties of the pinless friction stir spot welding of pure copper, Ferroelectrics, 2023, 615, 396-406.
<https://doi.org/10.1080/00150193.2023.2198948> (Web of Science)

5. Xiaole Ge, I.N. Kolupaev, Di Jiang, Hongfeng Wang. Investigation on the

welded joint properties of pinless friction stir spot welding of copper under different tool grooves, *Ferroelectrics*, 2024, 618,15-16, 2339-2354. DOI: <https://doi.org/10.1080/00150193.2024.2325888> (Web of science)

6. Di Jiang, Kolupaev, I.N, HongFeng, W., & Xiaole, G. (2025). Process optimization of refill friction spot stir of AA6061-T6 aluminum alloy for thick plate[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2025, 39, 4, p. 555 – 573. <https://doi.org/10.1080/01694243.2024.2416048> (Scoups).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Di Jiang, Igor Kolupaev. Effect of Process Parameters on the Performance of Refill Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloys, XVIII INTERNATIONAL CONFERENCE FOR MASTER AND POSTGRADUATE STUDENTS «Theoretical and practical research of young scientists», November 19-22, 2024.

8. Di Jiang, Igor Kolupaev. Numerical simulation analysis of refill friction stir spot welding based on DEFORM, XVII INTERNATIONAL CONFERENCE FOR MASTER AND POSTGRADUATE STUDENTS «Theoretical and practical research of Young Scientists», November 28-30, 2023.

9. Волков О.О., Субботіна В.В., Колупаєв І.М., Краєвська Ж.В., Jiang Di, Ge Xiaole. Вплив теплофізичних характеристик матеріалів на ефективність процесів з фрикційною складовою: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2023, 17–20 травня 2023 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». – 1406 с.

10. Subbotina V.V., Bilozerov V.V., Kolupaev I. N., Volkov O.O., Subbotin O.V., D. Jiang, Xiaole Ge Control of the magnitude and distribution of residual macro-stresses by roller rolling): Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXII міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2024, 22 – 25 травня 2024 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ».

11. Волков О.О., Субботіна В.В., Колупаєв І.М., Краєвська Ж.В., Jiang Di,

Ge Xiaole. Застосування тертя в якості високоенергетичного засобу зміни структурного стану матеріалів" Тез. доп. XXX Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я:– Харків: НТУ «ХПІ», 2022. – С. 222

12. Волков О.О., Субботіна В.В., Колупаєв І.М., Краєвська Ж.В., Jiang Di, Ge Xiaole. Технологічні принципи підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин та елементів конструкцій при модифікуванні їх поверхневих шарів методами ТФЗ, МДО та при зварюванні тертям з перемішуванням. VII Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти та молодих вчених «Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення і перспективи» Луцьк, 2022 р.

ABSTRACT

Jiang Di. Influence of Technological Parameters of Refill Friction Stir Spot Welding on the Mechanical Properties of Aluminum-Based Material Joints – Qualification Scientific Work as a Manuscript.

Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy (PhD) in Specialty 132 – Materials Science (13 – Mechanical engineering). – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The dissertation is devoted to the study of material deformation behavior and plastic flow mechanisms during welding, as well as the influence of process parameters on the microstructure and mechanical properties of welded joints.

The dissertation was carried out at Huangshan University, China, and at the Department of Materials Science, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

The aim of the dissertation is to establish the regularities of the influence of technological parameters (rotation speed, welding speed, tool diameter) on the quality of welded joints produced by refill friction stir spot welding of aluminum alloys, in order to optimize the process and ensure high mechanical properties.

The introduction highlights the relevance and importance of the research topic, defines the aim, subject, and main objectives of the dissertation. It also emphasizes the scientific novelty and practical significance of the obtained results.

The research objectives include:

1. To design and manufacture stirring tools of various diameters for refill friction stir spot welding (RFSSW) of thick aluminum plates.
2. To determine the influence of technological parameters on the formation of the microstructure and zonal distribution in welded joints.
3. To investigate the mechanical properties of the joints and identify optimal welding modes.
4. To develop a numerical model of the RFSSW process to predict joint

quality.

5. To establish the mechanisms of joint formation at different tool diameters.

Object of research: welded joints of 3 mm thick 6061-T6 aluminum alloy produced by refill friction stir spot welding.

Subject of research: the influence of stirring tool diameter (6–10 mm), rotation speed (1000–1600 rpm), and welding speed (20–50 mm/min) on the microstructure, mechanical properties, and formation mechanisms of 6061-T6 aluminum alloy joints.

The introduction substantiates the relevance of the chosen topic, formulates the aim and main research tasks, outlines the object and subject of the work, and lists the research methods used. The scientific novelty and practical significance of the results are emphasized. The personal contribution of the author is highlighted, and information on the approbation of the results and publications covering the main findings of the dissertation is provided.

The first chapter analyzes literature sources on the influence of friction welding parameters on the mechanical properties of aluminum-based material joints. It is shown that modern research focuses on improving the welding process through the development of new interaction mechanisms in the joint zone. Based on the literature analysis, the research objectives were formulated.

The second chapter presents the initial materials, experimental equipment, and research methodologies.

The third chapter analyzes the theoretical model of heat generation in the RFSSW zone and the metallographic structure under various process parameters. It is shown that in the spot welding zone, plunge speed is the main factor influencing heat generation, followed by rotation speed and tool diameter. The morphology of the weld surface significantly changes with varying process parameters and tool diameters, primarily under the combined influence of thermal effects and tangential velocity of the plasticized metal.

The fourth chapter investigates the characteristics of joints obtained by RFSSW, focusing on shear strength, microhardness, and fatigue performance. It is shown that tool diameter significantly affects the maximum shear strength in the spot

welding zone. Joints produced with smaller diameter tools tend to fail at the interface or through nub pull-out, whereas those welded with larger tools mostly exhibit partial nub fracture. The RFSSW zone undergoes recrystallization annealing, resulting in lower microhardness compared to the base material. The highest hardness is observed in the sleeve-affected zone, while the lowest is found in the thermo-mechanically affected zone. The fatigue life of RFSSW joints increases with increasing tool diameter.

The fifth chapter presents a numerical analysis of the RFSSW process based on experimental data using Deform V11.0 software. Representative process parameters were selected for simulation, resulting in the determination of temperature fields and internal metal flow in the spot welding zone. A numerical model of RFSSW was established, providing insights into stress, temperature, velocity fields, particle tracing, and mesh deformation at various welding stages. Numerical simulations demonstrated that increasing tool diameter significantly affects the temperature field in the welding zone. For small tool diameters, spatial spiral trajectories are more pronounced and decrease with distance from the weld center.

The sixth chapter uses a stop-action method to obtain macro- and microstructures of RFSSW at different stages. Metal flow in the spot welding zone was determined by combining stress and temperature field analyses obtained through numerical modeling. The mechanism of RFSSW zone formation for different tool diameters was established. Metal flow in the spot welding zone mainly exhibits a vertical spiral motion. Presents comprehensive experimental studies on RFSSW of 3 mm thick 6061-T6 aluminum alloy plates. The focus is on the stirring tool, particularly the influence of five different pin diameters on the formation of the spot welding zone. Experiments were conducted under various rotation and welding speeds with analyses of macro- and microstructure, microhardness, tensile and shear strength, fatigue properties, and dynamic stress-strain behavior. Additionally, a numerical model was constructed in Deform V11.0 to obtain stress, temperature, velocity fields, particle trajectories, and mesh deformation at different welding

stages. The obtained results allowed for the explanation of the RFSSW formation mechanism.

The conclusions summarize the main scientific findings obtained in the study.

Scientific results obtained for the first time:

1. Five types of stirring tools with diameters of 6–10 mm were systematically studied, and optimal technological parameters for defect-free welding of 3 mm thick 6061-T6 aluminum alloy were established.

2. The formation patterns of the characteristic «U» - shaped weld cross-section, slightly larger than the tool dimensions, were identified, and three main zones were distinguished: Pin Affected Zone (PAZ), Sleeve Affected Zone (SAZ), and Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ).

3. The critical role of the «Friction Stir Riveting Bonding Zone» in ensuring joint performance was determined, and correlations between grain size and zone location were established.

4. A direct relationship between tool diameter and tensile-shear force was established: 9.27, 13.74, 14.79, 16.83, and 18.16 kN for tool diameters of 6–10 mm, respectively, confirming the tool diameter as a key factor in joint strength.

5. A numerical model based on Deform V11.0 was developed, accurately describing the RFSSW process and enabling prediction of temperature fields, stresses, and metal flow in the welding zone.

6. Two mechanisms of joint formation were identified depending on tool diameter: “shear friction–in-situ rotation” for smaller diameters and “bilateral shear–central axial flow” for larger diameters.

Practical significance of the obtained results:

1. Technological recommendations were developed for selecting optimal RFSSW parameters for industrial applications when joining thick aluminum plates.

2. Criteria for tool diameter selection were established depending on joint strength requirements: smaller diameters result in interface failure, while larger ones lead to partial nugget fracture.

3. A methodology for predicting joint mechanical properties based on numerical modeling of the process was created.

4. The results were implemented in the educational process of NTU «KhPI» and can be applied in the automotive, railway, and aerospace industries.

Keywords: aluminum sheets, friction stir spot welding (RFSSW), microstructure, mechanical properties, comprehensive evaluation of performance characteristics, recrystallization, hardness, deformation, structure, metallographic analysis, design, modeling, copper, technological process, wear resistance, technology, method, microhardness, microstructure, steel.

List of scientific works relevant

Scientific works that contain the principal scientific findings of the dissertation:

1. Xiaole Ge, Igor Kolupaev, Weiwei Song, Di Jiang, Jiafei Pu, Hongfeng Wang, Yuan Chu. Influence of the process parameters on the microhardness and the wear resistance of the friction stir processed h65 copper alloy, Journal of Engineering and Technological Sciences, 2022, 54(6), 1143-1159. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.6.4> (Scopus)

2. Di Jiang, I. N. Kolupaev, HongFeng Wang & Xiaole Ge. Analysis of mechanical properties of 6010 aluminum alloy without Tool Tilt Angle friction stir welding[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2023,37(13), 2010-2024. <https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2109254> (Scopus)

3. Di Jiang, I. N. Kolupaev, HongFeng Wang, Xiaole Ge & Liu Hui . Study on the Performance of FSW Joint Welded of Aluminum Alloy by S-Type Track [J], Integrated Ferroelectrics, 2023,234(1), 115-125. <https://doi.org/10.1080/10584587.2023.2191556> (Scopus)

4. Xiaole Ge, I.N. Kolupaev, Di Jiang, Hongfeng Wang, Shouzhen Cao, Shengrong Liu. Effect of the tool rotation direction on the joint properties of the pinless friction stir spot welding of pure copper, Ferroelectrics, 2023, 615, 396-406. <https://doi.org/10.1080/00150193.2023.2198948> (Web of Science)

5. Xiaole Ge, I.N. Kolupaev, Di Jiang, Hongfeng Wang. Investigation on the welded joint properties of pinless friction stir spot welding of copper under different tool grooves, *Ferroelectrics*, 2024, 618,15-16, 2339-2354. DOI: <https://doi.org/10.1080/00150193.2024.2325888> (Web of science)

6. Di Jiang, Kolupaev, I.N, HongFeng, W., & Xiaole, G. (2025). Process optimization of refill friction spot stir of AA6061-T6 aluminum alloy for thick plate[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2025, 39, 4, p. 555 – 573. <https://doi.org/10.1080/01694243.2024.2416048> (Scoups).

Published works of approbation nature:

7. Di Jiang, Igor Kolupaev. Effect of Process Parameters on the Performance of Refill Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloys, XVIII INTERNATIONAL CONFERENCE FOR MASTER AND POSTGRADUATE STUDENTS “Theoretical and practical research of young scientists”, November 19-22, 2024.

8. Di Jiang, Igor Kolupaev. Numerical simulation analysis of refill friction stir spot welding based on DEFORM, XVII INTERNATIONAL CONFERENCE FOR MASTER AND POSTGRADUATE STUDENTS “Theoretical and practical research of Young Scientists”, November 28-30, 2023.

9. Volkov O.O., Subbotina V.V., Kolupaev I.M., Kraievskaya Zh.V., Jiang Di, Xiaole Ge. Influence of Thermophysical Properties of Materials on the Efficiency of Processes with a Friction Component, *Information Technology: Science, Engineering, Technology, Education, Health: Proceedings of the XXXI International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2023*, May 17–20, 2023 / Edited by Prof. Ye.I. Sokol. – Kharkiv: NTU “KhPI”. – 1406 p.

10. Subbotina V.V., Bilozero V.V., Kolupaev I.N., Volkov O.O., Subbotin O.V., Jiang D., Xiaole Ge. Control of the Magnitude and Distribution of Residual Macro-Stresses by Roller Rolling, *Information Technology: Science, Engineering, Technology, Education, Health: Proceedings of the XXXII International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2024*, May 22–25, 2024 / Edited by Prof. Ye.I. Sokol. – Kharkiv: NTU “KhPI”.

11. Volkov O.O., Subbotina V.V., Kolupaev I.M., Kraievska Zh.V., Jiang Di, Xiaole Ge. Application of Friction as a High-Energy Means of Changing the Structural State of Materials, Proceedings of the XXX International Scientific and Practical Conference “Information Technology: Science, Engineering, Technology, Education, Health”, Kharkiv: NTU “KhPI”, 2022. – P. 222.

12. Volkov O.O., Subbotina V.V., Kolupaev I.M., Kraievska Zh.V., Jiang Di, Xiaole Ge. Technological Principles for Improving the Operational Properties of Machine Parts and Structural Elements by Modifying Their Surface Layers Using TFZ, MDO, and Friction Stir Welding Methods, VII All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Higher Education Seekers and Young Scientists “Physics and Chemistry of Solids: State, Achievements and Prospects”, Lutsk, 2022.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЩОДО МЕТОДІВ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	12
1.1 Передумови та значення.....	12
1.2 Впровадження точкового зварювання тертям з перемішуванням. .	13
1.3 Види точкового зварювання тертям з перемішуванням..... .	14
1.3.1 Точкове зварювання тертям без поповнення тертям.....	14
1.3.2 Точкове зварювання тертям з перемішуванням.....	15
1.4 Переваги точкового зварювання тертям з перемішуванням.....	15
1.5 Стан досліджень у сфері ТЗТЗП.....	16
1.5.1 Дослідження параметрів процесу та продуктивності	16
1.5.2 Математичне моделювання точкового зварювання	17
1.5.3 Дослідження інструментів для ТЗТЗП	18
1.5.4 Дослідження точкового зварювання різнорідних матеріалів.....	19
1.5.5 Висновки та обговорення.....	19
1.6 Застосування ТЗТЗП.....	20
1.6.1 Застосування в аерокосмічній галузі.....	21
1.6.2 Застосування в автомобільній промисловості	20
1.6.3 Застосування в електронних пристроях.....	21
1.7 Зміст досліджень	21
РОЗДІЛ 2 ДИЗАЙН ВИПРОБУВАНЬ ТА МЕТОД ТЕСТУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТЗТЗП	23
2.1 Вступ	23
2.2 Випробувальне обладнання для ТЗТЗП.....	23
2.3 Випробувальний матеріал	24
2.4 Конструкція інструментів для перемішування	25
2.5 Процес ТЗТЗП	26
2.6 Налаштування параметрів процесу ТЗТЗП.....	27
2.7 Обладнання для проведення випробувань та підготовка зразків...	31
2.7.1 Розтягнення та зсув	31
2.7.2 Твердість	32
2.7.3 Металографічна структура	32
2.7.4 Характеристики втоми	32

2.8 Висновки до розділу	33
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ ЗОНИ ТОЧКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ	34
3.1 Передумови проведення дослідження.....	34
3.2 Аналіз тепловиділення в зоні точкового зварювання	34
3.3 Макроскопічний аналіз морфології зони ТЗТЗП.....	45
3.4 Мікроскопічний аналіз морфології зони ТЗТЗП	52
3.4.1 Мікроскопічний аналіз загальної морфології	52
3.4.2 Мікроскопічна морфологія границі між верхньою і нижньою пластинами в зоні точкового зварювання різних інструментів.....	54
3.4.3 Мікроскопічна топографія дна зони точкового зварювання.....	57
3.4.4 Мікроскопічна морфологія зонм ТМАЗ різних перемішуючих інструментів.....	59
3.4.5 Мікроскопічна морфологія ЗВПВ при використанні різних перемішувальних інструментів.....	63
3.4.6 Мікроморфологія зони ЗВГ при використанні різних інструментів для перемішування	64
3.5 Висновки до розділу	69
РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ЗОНИ ТОЧКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ.....	72
4.1 Вступ	72
4.2 Аналіз міцності на розтяг та зсув зони точкового зварювання....	72
4.2.1 Аналіз форми руйнування зони точкового зварного шва на розтяг при зсуві.....	72
4.2.2 Сила зсувного розтягування (СЗР) при використанні різних інструментів для перемішування.....	78
4.2.3 Взаємозв'язок між навантаження руйнування при випробуванні на розтяг-зсув і перемішуючим інструментом.....	90
4.3 Зв'язок між розподілом твердості та інструментом для перемішування	97
4.3.1 Розподіл твердості верхньої поверхні.....	97
4.3.2 Вплив діаметра перемішувального інструмента на твердість зони перемішування.....	100
4.4 Аналіз втоми зони точкового зварювання	103

4.6 Висновки до розділу	110
РОЗДІЛ 5 АНАЛІЗ ТЕПЛОВИДІЛЕННЯ ТА СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ТЗТЗП.....	112
5.1 Вступ	112
5.2 Створення математичної моделі	112
5.2.1 Налаштування параметрів імітаційної моделі	112
5.2.2 Побудова сітки	115
5.3 Аналіз результатів математичного моделювання	118
5.3.1 Математичне моделювання аналізу температурного поля	118
5.3.2 Математичний аналіз переміщення.....	122
5.4 Висновки до розділу	130
РОЗДІЛ 6 АНАЛІЗ МЕХАНІЗМУ ФОРМУВАННЯ ТЗТЗП.....	132
6.1 Вступ	132
6.2 Механізм формування ТЗТЗП.....	132
6.2.1 Процес формування ТЗТЗП при $d = 6$ мм.....	132
6.2.2 Процес формування ТЗТЗП при $d = 10$ мм.....	146
6.3 Висновки до розділу	156
ВИСНОВКИ	158
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	162
Додаток А.....	173
Додаток В.....	177
Позначення.....	179

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Точкове зварювання тертям з перемішуванням з заповненням (Refill Friction Stir Spot Welding, RFSSW, ТЗТЗП) належить до сучасних твердофазних технологій зварювання, що поєднують у собі високі експлуатаційні характеристики з'єднань, мінімальний тепловий вплив на матеріал та екологічність виробничого процесу. На відміну від традиційних методів зварювання плавленням, ТЗТЗП забезпечує формування з'єднань без утворення ливарної структури, зменшує ймовірність виникнення дефектів та зберігає високу якість матеріалу. Завдяки цим перевагам технологія набула широкого застосування у високотехнологічних галузях, зокрема у виробництві електромобілів, високошвидкісних потягів та аерокосмічних конструкцій, де пред'являються підвищені вимоги до міцності, надійності та довговічності з'єднань.

Останні тенденції у машинобудуванні та транспортній індустрії вимагають використання легких конструкцій із підвищеними показниками міцності та жорсткості, що зумовлює активне застосування високоміцних алюмінієвих сплавів, таких як 6061-Т6. При цьому зростає необхідність у створенні технологій, здатних забезпечувати якісне зварювання не лише тонких листів, а й товстостінних заготовок (3 мм і більше), що ускладнює процес через інтенсивні теплові та деформаційні поля в зоні зварювання.

Попри значний прогрес у дослідженнях RFSSW для тонких алюмінієвих листів, вплив технологічних параметрів, зокрема діаметра інструменту, швидкості обертання та швидкості зварювання, на формування мікроструктури і механічні властивості з'єднань товстих плит вивчений недостатньо. Брак комплексних досліджень цих аспектів стримує оптимізацію процесу і впровадження технології у масове виробництво.

Крім того, існує потреба у розробці достовірних математичних моделей, здатних прогнозувати теплові поля, механізми течії металу та формування зони зварного з'єднання. Поєднання експериментальних досліджень і моделювання

дозволяє глибше зрозуміти закономірності процесу та забезпечити розробку технологічних рекомендацій для промислового застосування.

У зв'язку з цим, **актуальність роботи** зумовлена необхідністю поглибленого розуміння закономірностей формування мікроструктури та властивостей алюмінієвих сплавів під час зварювання тертям з перемішуванням із заповненням (ТЗТЗП). Вивчення впливу технологічних параметрів процесу на фазові перетворення, морфологію зони з'єднання і механічні характеристики дає змогу на науковому рівні обґрунтувати вибір оптимальних режимів оброблення. Отримані результати є вагомими для матеріалознавства, оскільки поєднують дослідження структури, властивостей і технологічних факторів, що визначають довговічність та надійність зварних конструкцій з алюмінієвих сплавів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Матеріалознавство» НТУ «ХП» відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки». Частина отриманих результатів дисертаційних досліджень впроваджено в навчальний процес (в освітньо-професійні та освітньо-наукові програми) та розглядаються при вивченні дисциплін (освітніх компонентів): «Матеріали з особливими фізичними та механічними властивостями» (бакалаврська освітня програма), «Технології та обладнання для модифікування поверхні та об'ємної обробки матеріалів», «Термомеханічні методи впливу на властивості матеріалу», «Зносостійкі та антифрикційні матеріали» (магістерська освітня програма).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є встановлення закономірності впливу технологічних параметрів (швидкості обертання, швидкості зварювання, діаметра інструменту) на якість зварних з'єднань при точковому зварюванні тертям з перемішуванням з заповненням алюмінієвих сплавів для оптимізації процесу та забезпечення високих механічних властивостей.

Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні задачі:

5. Встановити вплив технологічних параметрів на формування мікроструктури та зонального розподілу в зварних з'єднаннях.
6. Дослідити механічні властивості з'єднань та визначити оптимальні режими зварювання.
7. Розробити математичну модель процесу точкового зварювання тертям з перемішуванням для прогнозування якості з'єднань.
8. Встановити механізми формування з'єднань при різних діаметрах інструменту.

Об'єкт дослідження – Процес утворення зварних з'єднань алюмінієвого сплаву 6061-Т6, отриманих методом точкового зварювання тертям з перемішуванням із заповненням.

Предмет дослідження – Закономірності впливу технологічних параметрів (діаметра перемішувального інструменту, швидкості обертання та швидкості зварювання) на мікроструктуру, механічні властивості та механізми формування з'єднань алюмінієвого сплаву 6061-Т6.

Методи дослідження – Металографічний аналіз, оптична та електронна мікроскопія, механічні випробування на розтяг-зсув та втому, вимірювання мікротвердості, математичне моделювання на базі програмного комплексу Deform V11.0.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

1. Системно досліджено з удосконаленням п'ять типів перемішуючих інструментів діаметром 6-10 мм та встановлено оптимальні технологічні параметри для бездефектного зварювання алюмінієвого сплаву 6061-Т6 товщиною 3 мм.
2. Встановлено закономірності формування характерного "U"-подібного профілю поперечного перерізу зварного шва з розмірами, що дещо

перевищують розміри інструменту, та виявлено три основні зони: зону впливу стрижня, зону впливу гільзи та зону термомеханічного впливу.

3. Визначено критичну роль "зони зчеплення при фрикційному заклепуванні з перемішуванням" у забезпеченні експлуатаційних характеристик зварного шва та встановлено кореляцію між розміром зерна та положенням зони.

4. Встановлено пряму залежність між діаметром інструменту та рівнем сили розтягуючого зсуву: 9,27; 13,74; 14,79; 16,83 та 18,16 кН для діаметрів 6-10 мм відповідно, що підтверджує діаметр інструменту як ключовий фактор міцності з'єднання.

5. Розроблено математичну модель на базі Deform V11.0, що адекватно описує процес RFSSW та дозволяє прогнозувати температурні поля, напруження та характер течії металу в зоні зварювання.

6. Встановлено два механізми формування з'єднань залежно від діаметра інструменту: "тертя зсуву-обертання на місці" для малих діаметрів та "двосторонній зсув-центральный осьовий потік" для великих діаметрів.

Практична значимість отриманих результатів.

1. Розроблено технологічні рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів точкового зварювання тертям з перемішуванням для промислового застосування при з'єднанні товстих алюмінієвих плит.

2. Встановлено критерії вибору діаметра інструменту залежно від вимог до міцності з'єднання: менші діаметри призводять до руйнування по межі розділу, більші – до часткового руйнування зони перемішування.

3. Створено методологію прогнозування механічних властивостей з'єднань на основі математичного моделювання процесу.

4. Результати впроваджені в навчальний процес НТУ "ХПІ" та можуть бути використані в автомобільній, залізничній та аерокосмічній промисловості.

Результати досліджень впроваджено (Додаток Б):

в навчальний процес кафедри «Матеріалознавство», НТУ «ХПІ».

Авторський внесок здобувача полягає у розробці та виготовленні

інструментів різного діаметра для дослідження ТЗТЗП алюмінієвих сплавів, встановленні закономірностей впливу технологічних параметрів на мікроструктуру та механічні властивості з'єднань, виявленні ключових механізмів формування зони зварного шва та їх зв'язку з міцністю, проведенні експериментів з аналізом структури, твердості, міцності та втомної поведінки з'єднань, створенні математичної моделі процесу ТЗТЗП у Deform V11.0 і підтвердженні її результатами експериментів, розробці технологічних рекомендацій для оптимізації зварювання товстих алюмінієвих плит.

(Додаток А):

1) фахові видання України та видання, які індексуються міжнародними наукометричними базами (Scopus):

[1] – здобувачем розроблена концепція дослідження, проведення експериментів з ТЗТЗП, обробка та аналіз отриманих результатів, написання основного тексту статті. Співавторами: Wang Н – участь у плануванні експериментів, допомога в аналізі мікроструктури та механічних властивостей, редагування та доопрацювання рукопису; Колупаєвим І.М. – наукове консультування, обговорення результатів і загальне керівництво дослідженням.

[2] – здобувач розробив концепції дослідження, виконання математичного моделювання ТЗТЗП, аналіз результатів, підготовка основного тексту статті. Співавторами: Колупаєвим І.М. – наукове консультування, постановка завдання та корекція методики, редагування рукопису; Н. Wang – допомога у створенні моделей і валідації розрахунків, обговорення результатів; Х. Ge – обробка експериментальних даних і підготовка графічних матеріалів для статті.

[3] – здобувач провів експерименти з FSW без кута нахилу інструмента, аналіз механічних властивостей зварних з'єднань, написання основного тексту. Співавторами: Колупаєвим І.М. – наукове керівництво, постановка дослідження, рецензування та доопрацювання рукопису; Н. Wang – участь у випробуваннях та механічному тестуванні, підготовка частини результатів; Х. Ge – участь у статистичній обробці даних та підготовці

ілюстрацій.

[4] – здобувач проводив планування дослідження, виконання зварювальних експериментів за S-подібною траєкторією, аналіз макро- та мікроструктур, підготовка рукопису. Співавторами: Колупаєвим І.М. – науковий супровід, визначення методології та рецензування статті; Н. Wang – допомога в аналізі механічних випробувань, узагальнення результатів; Х. Ge – аналіз мікроструктур, оформлення графічних матеріалів; Liu Hui – внесок у дослідження впливу траєкторії інструмента на структуру і властивості зварних з’єднань.

[5] – здобувач провів експерименти з оптимізації процесу ТЗТЗП для товстих плит, аналіз результатів, написання статті. Співавторами: Колупаєвим І.М. – наукове керівництво, формування структури роботи, редагування та доопрацювання рукопису; Н. Wang – участь у проведенні випробувань та перевірці результатів; Х. Ge – допомога у візуалізації результатів та оформленні рукопису.

[6] – здобувач здійснив розробку концепції та конструкції коаксіального пристрою для температурного контролю під час процесів тертя з перемішуванням. Співавторами: Колупаєвим І.М. – надав підтримку у вигляді технічних консультацій під час розробки; Н. Wang – брав участь у доопрацюванні конструктивних рішень та допомагав з оформленням матеріалу; Х. Ge – визначив технічні вимоги, спроектував робочі елементи пристрою та забезпечив інтеграцію системи вимірювання і регулювання температури.

Апробація результатів. Апробація наукових результатів здійснювалася шляхом їх представлення на міжнародних науково-практичних конференціях. В ході обговорень отримані результати були визнані актуальними, а висновки такими, що мають наукову та практичну цінність: XVIII INTERNATIONAL CONFERENCE FOR MASTER AND POSTGRADUATE STUDENTS “Theoretical and practical research of young scientists” (November 19-22, 2024); XVII INTERNATIONAL CONFERENCE FOR MASTER AND POSTGRADUATE STUDENTS “Theoretical and practical research of Young

Scientists” (November 28-30, 2023); Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: матеріали XXXI міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2023 (м. Хаків, 17–20 травня 2023 р.); Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я (MicroCAD-2024) : матеріали XXXII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 22–25 трав. 2024 р.); Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я «MicroCAD-2022»: матеріали XXX Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 19–21 жовт. 2022 р.); VII Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти та молодих вчених «Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення і перспективи» (Луцьк, 2022 р.).

В повному обсязі дисертаційна робота обговорювалась та схвалена на розширених засіданнях кафедри «Матеріалознавство» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Публікації. Основні положення і результати дисертаційних досліджень, які виносяться на захист, опубліковані в 12 наукових працях: 6 статей – у наукових виданнях, які індексується наукометричною базою Scopus, та 6 матеріалів апробаційного характеру.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, шістьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Робота містить 161 сторінку основного тексту, серед них: 110 рисунків, 14 таблиць, 106 найменувань в списках використаних джерел, 6 сторінок додатків. Загальний обсяг роботи викладено на 194 сторінках.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ЩОДО МЕТОДІВ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ, МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Передумови та значення

Завдяки високій питомій міцності, простоті обробки, легкому формуванню та корозійній стійкості алюмінієві сплави займають дуже важливе місце в багатьох галузях промисловості, таких як суднобудування, аерокосмічна промисловість, автомобілебудування та залізничний транспорт [1-5]. Вимоги до легкості та швидкості в сучасному транспорті призвели до того, що традиційні сталеві конструкції, які мають низьку питому міцність, стають дедалі менш прийнятними. Хоча титанові сплави мають високу міцність, їхня висока вартість обмежує використання в аерокосмічній галузі. На противагу цьому, алюмінієві сплави поєднують високу питому міцність з економічністю обробки, що робить їх широко вживаними. Оскільки невідновлювані джерела енергії зменшуються, вуглецеві обмеження посилюються, а відновлювані джерела енергії зростають, автомобільна промисловість переходить до транспортних засобів з новими джерелами енергії. Ці транспортні засоби мають важчі силові установки, що збільшує загальну вагу і скорочує термін служби. Тому легкі кузови з алюмінієвих сплавів замінюють сталь, стаючи ключовим напрямком у дизайні транспортних засобів [6-7].

Як конструкційний матеріал, алюмінієвий сплав стикається з проблемами при з'єднанні деталей. На відміну від сталі, яка має довгу історію і розвинені методи з'єднання, такі як зварювання плавленням, контактне зварювання і клепка [8-10], висока теплопровідність алюмінію робить зварювання плавленням схильним до дефектів - особливо з різнорідними сплавами. Це обмежує його використання, і саме тому Tesla використовує великі литі деталі, щоб зменшити кількість з'єднань, незважаючи на вищі початкові витрати. Як наслідок, зварювання алюмінієвих конструкцій стало предметом досліджень, що призвело до розробки таких методів, як зварювання

вольфрамовим електродом в середовищі інертного газу, лазерне зварювання, контактне зварювання та зварювання тертям з перемішуванням [11-12].

1.2 Вступ до точкового зварювання тертям з перемішуванням

Використання легких сплавів, таких як алюміній, у виробництві зростає, що робить надійне, економічне і довговічне точкове зварювання необхідним для з'єднання конструкцій. Точкове зварювання алюмінію в основному ґрунтується на контактному точковому зварюванні, яке використовує нагрівання струмом, але його нестабільність обмежує ширше застосування у зварюванні алюмінію.

Зварювання тертям з перемішуванням - це твердотільний процес, який використовує тертя між інструментом і матеріалом для виділення тепла і розм'якшеним металу. Як показано на рисунку 1.1, його пікова температура становить менше двох третин від температури плавлення основного металу, що робить його ідеальним для чутливих до температури металів. Точкове зварювання тертям з перемішуванням, розроблене на основі цього методу, також дозволяє отримати високоякісні зварні шви з алюмінієвих сплавів і дає можливість подальшого розвитку технології.

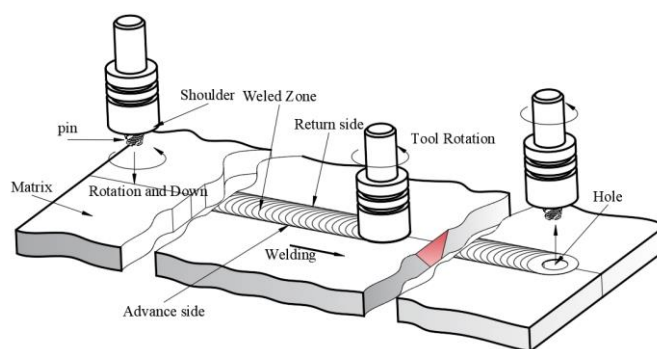


Рисунок 1.1 – Принципова схема зварювання тертям з перемішуванням

Точкове зварювання тертям з перемішуванням (ТЗТП) було запропоновано в 1997 році і вперше розроблено компаніями Mazda і Kawasaki Heavy Industries в 2003 році. Він був успішно застосований для капота і задніх дверей Mazda RX-8. Порівняно з традиційним контактним точковим

зварюванням, ТЗТП зменшує споживання електроенергії на 99%, витрати на обладнання - на 40%, а загальні виробничі витрати - лише на одну п'яту [13].

Завдяки своїм численним перевагам, зварювання тертям з перемішуванням (ТЗТП) широко застосовується для з'єднання алюмінієвих сплавів, а обсяг технічних досліджень у цій галузі постійно зростає. Після майже 20 років розвитку, ТЗТП охоплює два основні різновиди: не точкове зварювання тертям з перемішуванням та точкове зварювання тертям з перемішуванням. Якщо на початкових етапах застосовували переважно неплавке зварювання, то нині більш поширеним стало плавке зварювання тертям з перемішуванням.

Сучасні зварювальні технології розвинулися таким чином, щоб забезпечувати:

- швидкоз'єднання,
- зварювання зі змінною траєкторією інструмента,
- з'єднання різнорідних матеріалів,
- високошвидкісне зварювання.

Це дозволяє ефективно задовольняти зростаючі вимоги до з'єднання конструкцій з алюмінієвих сплавів [14–18].

1.3 Види точкового зварювання тертям з перемішуванням

1.3.1 Точкове зварювання тертям без поповнення тертям

Точкове зварювання тертям без поповнення тертям (ТЗТБП) має замкову щілину після завершення точкового зварювання, і, як правило, потрібно усунути цей дефект за допомогою зварювання розплаву, клепки пробок, точкового зварювання вторинним наповнювачем тощо, а точкове зварювання можна виконати за допомогою інструменту для перемішування в осьовому напрямку, Робочий процес показаний на рисунку 1.2 [19-22].

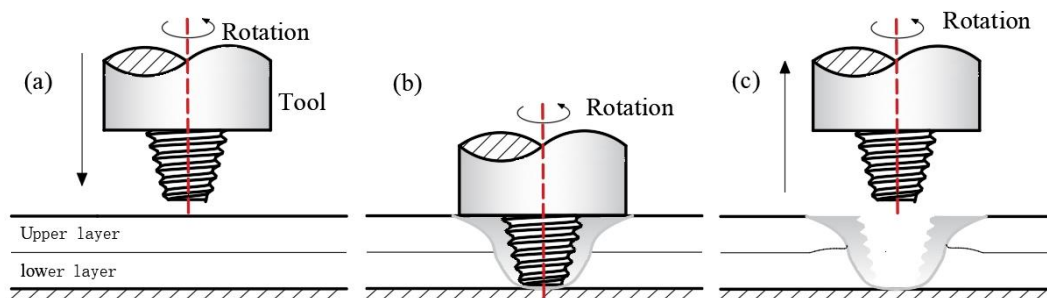


Рисунок 1.2 – Принципова схема ТЗТБП (зі стрижнем)

1.3.2 Точкове зварювання тертям з перемішуванням

Для усунення дефектів, зокрема замкових отворів, що виникають під час точкового зварювання тертям без перемішування, а також при зварюванні товстостінних матеріалів, німецька компанія RIFTEC розробила вдосконалену технологію – точкове зварювання тертям з перемішуванням із можливістю перезаправки (ТЗТЗП).

Ця технологія передбачає використання:

- обертним стрижнем (інструмент),
- сорочки з незалежним осьовим переміщенням,
- фіксованої гільзи, яка притискає з'єднувані елементи.

Під час процесу зварювання між вказаними елементами формується закрыта високотемпературна порожнина, яка заповнюється металом. У процесі подальшого переміщення інструмента ця порожнина стискається й зникає, завершуючи зварювання за рахунок всмоктування металу та його видавлювання під тиском, як показано на рисунку 1.3 [23–25].

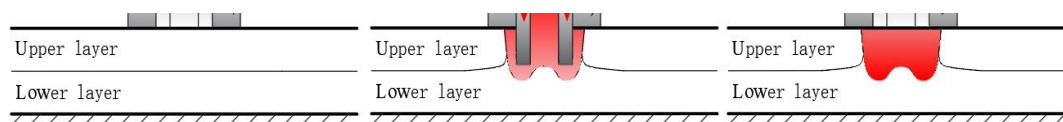


Рисунок 1.3 – Принципова схема ТЗТЗП

1.4 Переваги точкового зварювання тертям з перемішуванням

Точкове зварювання тертям з перемішуванням, що розвинулося на основі зварювання тертям, зберігає свої ключові переваги: низька температура і

термічне напруження, низька вартість, висока якість і очищене зерно без дефектів, таких як пористість або тріщини. Його температура залишається нижчою за температуру плавлення, що робить його ідеальним для чутливих до температури алюмінієвих і магнієвих сплавів, а також дозволяє зварювати різnorідні метали, те, з чим традиційне точкове зварювання не може впоратися [26-31].

Точкове зварювання тертям з перемішуванням не потребує дуги, присадок, струму або захисного газу (за винятком особливих випадків), має високий рівень автоматизації та низьке енергоспоживання. Порівняно з традиційним контактним зварюванням, це майбутня основна технологія точкового зварювання [32-43].

1.5 Стан досліджень у сфері ТЗТЗП

Основні напрямки досліджень зосереджені на параметрах процесу точкового зварювання, течії металу в зоні точкового зварювання, математичному моделюванні та проектуванні перемішуючого інструменту тощо, і на цій основі зварювання між різnorідними матеріалами було глибоко обговорено, а також отримано велику кількість експериментальних даних для використання більшістю наукових дослідників, що забезпечує необхідну основу для розвитку цієї технології.

1.5.1 Дослідження параметрів процесу та продуктивності

Z.hen та ін. [44] виконали ТЗТЗП на алюмінієвому сплаві AA7075-T6 товщиною 0,8 мм, результати показують, що міцність на зсув збільшується зі збільшенням часу точкового зварювання і глибини проплавлення зі збільшенням діаметра сердечника. Chengcong Zhang та ін. [45] використовували повітря та аргон як охолоджуючі гази для проведення ТЗТЗП на пластинах Mg-Li товщиною 2,2 мм. Результати показали, що процес точкового зварювання з охолодженням аргонem зменшив утворення оксиду і створив рівну і гладку поверхню точкового зварювання. Campanelli LC та ін.

[46] досліджували тривимірний механізм руйнування і шлях поширення тріщини при точковому зварюванні магнієвого сплаву AZ31 при різних параметрах процесу. Результати показують, що оптимальне руйнівне навантаження може бути отримане при максимізації параметрів інструменту, повного розміру металургійного зв'язку та мінімізації вертикального зсуву в зоні зачепа. Кубіт та ін. [47] використовували різні параметри процесу точкового зварювання для дослідження несучої здатності ТЗТЗП з алюмінієвого сплаву 7075-T6, результати показують, що важливими параметрами, що впливають на зону точкового зварювання, є тривалість точкового зварювання та глибина різання інструменту. Рейман М та ін. [48] провели ТЗТЗП алюмінієвого сплаву AA7075-T651 товщиною 6 мм для вивчення еволюції термічного циклу, результати показують, що пікова температура сягає 540 ° за Цельсієм.

Інші дослідники також провели детальні дослідження режимів руйнування при зсуві та втомного руйнування в зонах точкового зварювання магнієвих та алюмінієвих сплавів [49-51]. У таблиці 1.1 наведені подальші дослідження різних вчених щодо межі руйнування при зсуві (МРЗР) для різних матеріалів.

Таблиця 1.1 – МРЗР точкового зварювання при різних параметрах процесу

Матеріали	МРЗР /кН	Матеріали	МРЗР/кН
7В04-Т74 алюмінієвий сплав	11.9 [52]	6061-Т6 алюмінієвий сплав	7.5 [57]
6181-Т4 алюмінієвий сплав	7 [53]	AZ91D алюмінієвий сплав	6.4 [58]
7075-Т6 алюмінієвий сплав	6.48 [54]	2029 алюмінієвий сплав	12 [59]
2198-Т8 алюмінієвий сплав	9.4 [55]	2А12-Т4 алюмінієвий сплав	10 [60]
5083- алюмінієвий сплав	7.72 [56]	6061-Т6 алюмінієвий сплав	14.79 [61]

1.5.2 Математичне моделювання точкового зварювання

Ji Shude та ін. [63] взяли алюмінієвий сплав LY12 як об'єкт дослідження для моделювання поведінки потоку матеріалу в процесі ТЗТЗП. Незалежно від

вищої теплової потужності, більший зовнішній діаметр гільзи значно збільшує швидкість потоку і зону отриманого з'єднання порівняно зі зміною геометрії канавки. Md Reza-E-Rabby та ін. [64] розробили процес ТЗТЗП у вигляді з'єднання типу «ластівчин хвіст» і запропонували метод моделювання для прогнозування механічних властивостей товстостінних з'єднань Al-сталь. Показано, що розроблений метод може бути ефективно застосований для проектування та аналізу з'єднань типу «ластівчин хвіст» з використанням стандартних програмних засобів моделювання. Yousefi A та ін. [65] провели математичне дослідження втомної поведінки та міцності на розрив зварного з'єднання ТЗТЗП алюмінієвого сплаву А6061-Т4 за допомогою програмного забезпечення Abaqus. Результати показують, що міцність на розрив заповненої зони точкового зварювання вища, ніж у випадку зварного з'єднання, отриманого стандартними способами, але втомна міцність при більшому навантаженні нижча, ніж у останнього.

1.5.3 Дослідження інструментів для ТЗТЗП

Інструмент для перемішування є в основі цієї технології та безпосередньо пов'язаний із формуванням стану та кінцевими властивостями зони точкового зварного з'єднання, яка може суттєво відрізнятися за геометрією та розмірами. У цьому контексті Shen Z та ін. [66–69] провели значну кількість досліджень, використовуючи інструмент для перемішування з прорізом для вивчення процесу RFSSW на зразках із різномірного сплаву Al/Mg. Результати показали, що успіх з'єднання алюмінієвого сплаву з магнієвим значною мірою залежить від глибини проникнення інструмента для перемішування. Шар інтерметалічних сполук на межі з магнієм впливає на металургійне зчеплення та механічне зачеплення, а міцність на зсув унахлест зони точкового зварювання зменшується зі збільшенням швидкості обертання, при цьому розсіювання результатів зростає, досягаючи максимуму 3,6 кН при 1000 об/хв. Водночас розмір зерна, якість міжфазного з'єднання та міцність на зсув унахлест суттєво залежать від глибини проникнення гільзи. При використанні вдосконаленого інструмента з трьома канавками можна отримати бездефектне

точкове зварне з’єднання, а металургійне зчеплення, перемішування матеріалу та механічне зачеплення значно покращуються. Однак більш очевидним є те, що ці дослідження в основному проводилися з використанням інструментів для перемішування, які мали діаметр перемішувальним стрижнем 6 мм і діаметр перемішувальної гільзи 9 мм.

1.5.4 Дослідження точкового зварювання різномірних матеріалів

Точкове зварювання тертям з перемішуванням між різномірними матеріалами є актуальним напрямом досліджень для багатьох учених. Завдяки цій технології вдається досягти результатів, недосяжних за допомогою традиційних методів зварювання. У таблиці 1.2 наведено кілька успішних прикладів її застосування.

Таблиця 1.2 – Тематичне дослідження точкового зварювання тертям з перемішуванням між різномірними матеріалами

Матеріали		Матеріали
5754 Алюміній / Сталь [70]		Mg / Сталь [75]
Алюміній / Steel [71]		Алюміній /ST16 [76]
AZ31-O/ Вуглецеве волокно [72]		Алюміній /AZ31 магній [77, 81]
ZEK100 магній /DP600 Сталь [73]		Aluminum / мідь [78-79]
5754 Алюміній /AZ31 магній [74]		Al6022-T4/Al7075-T6 [80]

1.5.5 Висновки до розділу

З наведеного вище узагальнення та аналізу існуючих результатів досліджень видно, що параметри процесу є найбільш вивченими для ТЗТЗП, за ним слідує точкове зварювання між різномірними матеріалами, а досліджень щодо діаметру перемішуючого інструменту небагато, але в той же час деякі вчені припускають, що продуктивність зони точкового зварювання може бути покращена при збільшенні діаметра перемішуючого інструменту, особливо міцність на розрив при зсуві зони точкового зварювання є дуже значною [82].

У той же час, товщина пластин, що використовуються в існуючих дослідженнях, в основному менше 2,5 мм, а дослідження точкового зварювання більш товстих пластин дуже рідкісні.

1.6 Застосування ТЗТЗП

Точкове зварювання тертям з перемішуванням (ТЗТЗП) — це передова технологія твердофазного з'єднання, що базується на генерації тепла внаслідок тертя, яке переводить матеріал у пластичний стан. Завдяки цьому здійснюється надійне точкове зварювання без переходу в рідку фазу. Технологія забезпечує високу міцність і якість зони з'єднання, тому знаходить широке застосування в різних галузях промисловості.

1.6.1 Застосування в аерокосмічній галузі

Аерокосмічна промисловість має дуже високі вимоги до міцності конструкції, ваги і надійності, а легкі сплави, такі як алюміній, титан і алюмінієво-літєві сплави, часто використовуються для виготовлення фюзеляжів літаків, крил та інших важливих конструкцій з метою зменшення загальної маси і збільшення вантажопідйомності. Зварювання легких сплавів традиційними методами заклепування і зварювання плавленням важко здійснити. ТЗТЗП використовує переваги власного твердофазного точкового зварювання для якісного точкового зварювання легких сплавів, що підвищує довговічність і втомну міцність деталей конструкцій.

1.6.2 Застосування в автомобільній промисловості

Легкість і висока продуктивність - це цілі, які переслідує Hyundai Motor, особливо в автомобілях на нових джерелах енергії. Завдяки постійному вдосконаленню технології ТЗТЗП можна також застосовувати точкове зварювання різнорідних сплавів між сталлю та алюмінієм, яке в основному використовується у виробництві дверей, дахів, кришок двигунів та кузовних конструкцій, RFSSW може забезпечити кращу якість точкового зварювання,

ніж традиційне контактне точкове зварювання, рис. 1.4 - це фото ТЗТЗП на капоті автомобіля.



Рисунок 1.4 – Застосування ТЗТЗП на капоті автомобіля

1.6.3 Застосування електронних пристроїв

Багато компонентів електронного обладнання виготовляються точковим зварюванням між різними легкими металевими матеріалами, традиційне контактне зварювання через велику кількість тепла спричиняє прокол або погане формування. Технологія ТЗТЗП дозволяє досягти низькотемпературного точкового зварювання, може бути хорошим точковим зварюванням різних легких металевих матеріалів в електронних виробках, технологія може застосовуватися у виробництві мобільних телефонів, планшетів, ноутбуків та інших конструкцій, пов'язаних із побутовою електронікою (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Застосування ТЗТЗП в радіаторі з водяним охолодженням

1.7 Зміст дослідження

У цій дисертації досліджено ТЗТЗП пластин з алюмінієвого сплаву 6061-Т6 товщиною 3 мм для досягнення зварювання на пластинах товщиною ≥ 2 мм. Було розроблено та випробувано різні інструменти для перемішування, щоб

проаналізувати, як діаметр інструменту та параметри процесу впливають на продуктивність точкового зварювання. Точкові шви були виконані з різною швидкістю обертання та проплавлення. Для оцінки продуктивності були проаналізовані макро/мікроструктура, межа міцності на розрив, втомна міцність, мікротвердість і динамічне напруження. Також вивчався вплив температури, напружень і потоку металу на формування зварного шва. Маршрут дослідження та технічна схема показані на рисунку 1.6.

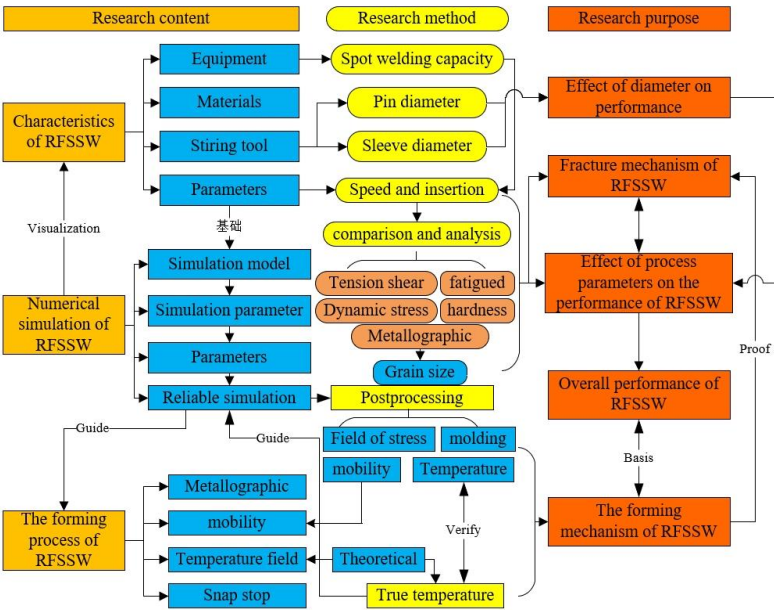


Рисунок 1.6 – Маршрут дослідження

**РОЗДІЛ 2 ДИЗАЙН ВИПРОБУВАНЬ ТА МЕТОД ТЕСТУВАННЯ
ПРОДУКТИВНОСТІ ТЗТЗП**

2.1 Устаткування та ТЗТЗП

Процес ТЗТЗП є складним, діаметр інструменту, швидкість обертання інструменту та швидкість зварювання є найбільш впливовими. У цьому дослідженні проводяться випробування точкового зварювання за цими трьома ключовими параметрами, аналізуючи їх вплив на продуктивність зварювальної зони. Для кращої диференціації цих параметрів вони наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Умовні позначення параметрів та їх значення

Символ	Значення	Одиниця виміру
D	Діаметр гільзи мішалки	мм
d	Діаметр мішалки	мм
H	Товщина листа	мм
h	Глибина точкового зварювання	мм
ω	Швидкість обертання	Об/хв
ν	Швидкість зварювання	мм/хв
P	Сила притискання	кН
T	Температура	°C
t	Час зварювання	с
F	Зусилля розтягування при зсуві	кН

2.2 Випробувальне обладнання ТЗТЗП

Для проведення випробування ТЗТЗП використовується настільне обладнання для точкового зварювання тертям з перемішуванням виробництва China Saifust Company, максимальна швидкість обертання шпинделя - 3000 об/хв, максимальна глибина точкового зварювання - 5 мм, як показано на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Модель обладнання ТЗТЗП

2.3 Випробувальний матеріал

В якості експериментального матеріалу в цій роботі був обраний алюмінієвий сплав 6061-Т6 товщиною 3 мм, який має переваги хорошої продуктивності обробки, широкого застосування та високої питомої міцності, відповідно до стандарту ISO 18785-5:2018 «Точкове зварювання тертям з перемішуванням алюмінію - Частина 5: Вимоги до якості та контролю». Хімічний склад прямокутних зразків 100 мм × 35 мм × 3 мм та експлуатаційні характеристики наведені в таблиці 2.2 та таблиці 2.3, а на рисунку 2.2 показано розподіл розмірів зерен.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад, вміст /% (масова частка) основного металу

Елементний склад (масова частка), %.								
Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
0.65	0.56	0.28	1.08	0.052	0.2	0.01	0.019	основа

Таблиця 2.3 – Механічні властивості та фізичні властивості основного металу

Межа міцності на розрив Rm/МПа	Подовження %	Коефіцієнт теплового розширення 10 ⁻⁵ /°C	Температура плавлення °C	Твердість HV
304	14	2.36	650	92

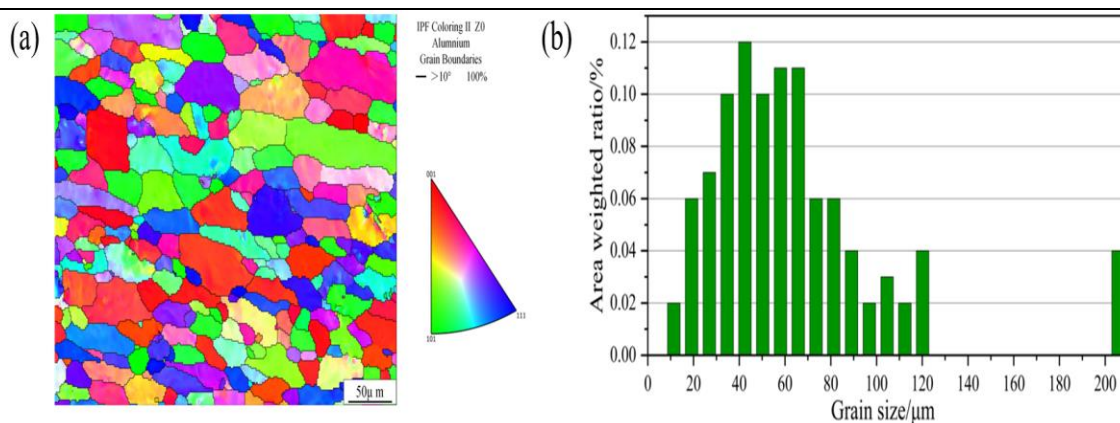


Рисунок 2.2 – Зерна основного металу

2.4 Конструкція інструментів для перемішування

Інструменти для точкового зварювання тертям з перемішуванням (ТЗТЗП) повинні працювати на високих обертах за умов підвищеної температури та значного притискного зусилля, тому до них висуваються вимоги високої міцності та жорсткості. Попередні випробування показали, що при діаметрі гільзи 16 мм наявне обладнання не здатне завершити процес зварювання через надмірний опір, що спричиняє зупинку її обертання і унеможливорює формування ефективного точкового з'єднання. Водночас, використання гільзи меншого діаметра (8 мм) призводить до неефективного заповнення зони зварювання, що також ускладнює утворення якісного шва. Вказані явища ілюстровані на рисунку 2.3.

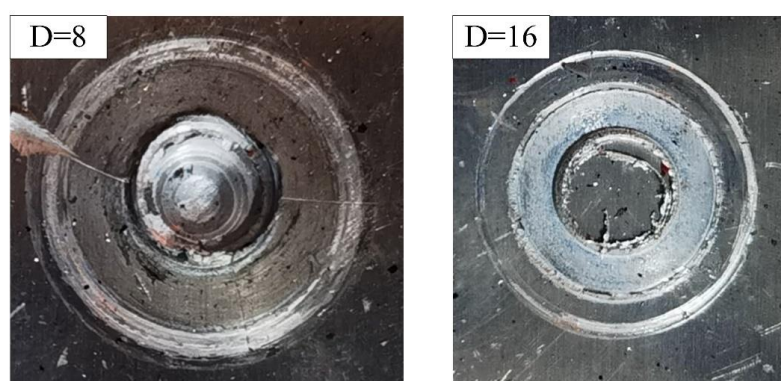


Рисунок 2.3 – Морфологія зони точкового зварювання з різним діаметром мішалки

Отже, мінімальний діаметр перемішуючого стрижня d становить 6 мм, а

відношення діаметра перемішуючої гільзи до стрижня фіксується на рівні 1,5, що обмежується шириною пластини, яка підлягає точковому зварюванню, а діаметр D перемішуючої гільзи повинен бути менше половини ширини пластини, тобто максимальний - 17,5 мм.

Для того, щоб отримати кращий ТЗТЗП, відповідно до результатів експерименту, діаметр перемішуючого інструменту показаний в таблиці 2.4. На рисунку 2.4 показана фактична картина.

Таблиця 2.4 – Порівняльна таблиця діаметрів перемішувальної гільзи та перемішувального стрижня

No	d6	d7	d8	d9	d10
D (мм)	9	10	12	13.5	15
d (мм)	6	7	8	9	10



Рисунок 2.4 – Інструменти для точкового зварювання різних діаметрів

2.5 Процес ТЗТЗП

У цій дисертації процес ТЗТЗП використовується для вставки перемішуючої гільзи, а конкретний технологічний процес показаний на рисунку 2.5.

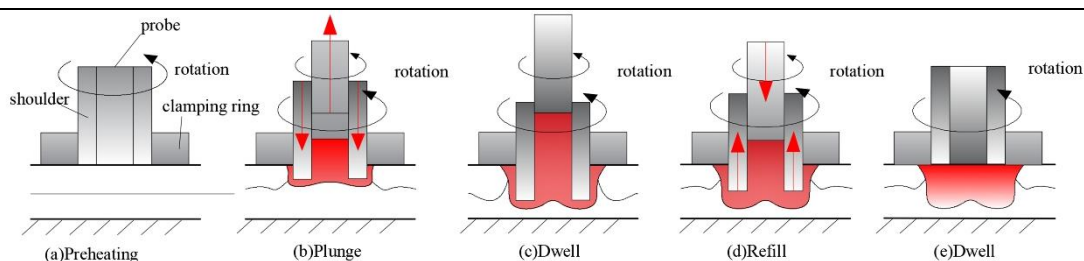


Рисунок 2.5 – Блок-схема процесу точкового зварювання тертям з перемішуванням

Як видно з рисунка 2.5, перемішувальна гільза та перемішувальний стрижень підтримують однакову швидкість протягом усього процесу точкового зварювання, а осьовий рух у зворотному напрямку генерується на стадіях введення та втягування, швидкість обертання становить ω , а осьова швидкість проникнення та втягування - v , а конкретне випробування точкового зварювання та принципова схема показані на рисунку 2.6.

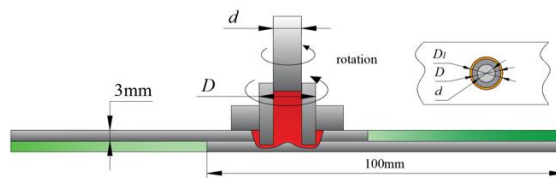
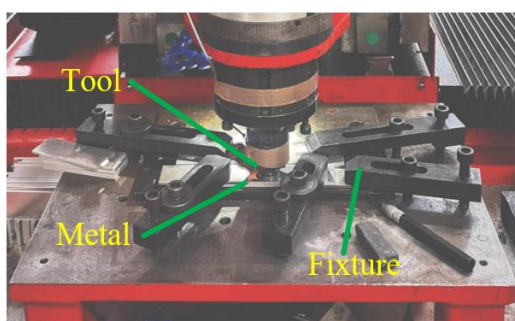


Рисунок 2.6 – Розташування обладнання та монтажної пластини ТЗТЗП та принципова схема

2.6 Налаштування параметрів процесу ТЗТЗП

Відповідно до діаметра мішалки та потужності обладнання, швидкість обертання мішалки становить від 800 до 2000 об/хв, а швидкість проникнення мішалки - від 10 до 50 мм/хв, а конкретні параметри процесу та фактичний ефект точкового зварювання наведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Налаштування параметрів процесу та фактичний ефект точкового зварювання

Параметр процесу	Точково зварена форма					примітка
	d6	d7	d8	d9	d10	
$\omega=800$ об/хв	√	×	×	×	×	× : Поповнення не повністю
$\omega=1000$ об/хв	√	√	√	√	√	
$\omega=1200$ об/хв	√	√	√	√	√	
$\omega=1400$ об/хв	√	√	√	√	√	
$\omega=1600$ об/хв	√	√	√	√	√	
$\omega=1800$ об/хв	√	√	×	×	×	×: Витягування припою
$\omega=2000$ об/хв	√	√	×	×	×	×: Витягування припою
$v=10$ мм/хв	×	√	×	×	×	×: Витягування припою
$v=20$ мм/хв	√	√	√	√	√	
$v=30$ мм/хв	√	√	√	√	√	
$v=40$ мм/хв	√	√	√	√	√	
$v=50$ мм/хв	√	√	√	√	√	

З таблиці 2.5 видно, що випробування ТЗТЗП проводиться з перемішувачами інструментами різних розмірів і параметрів процесу. Виявлено, що менша швидкість обертання та швидкість введення легко призведе до порушення формування точкового зварювання, неповного заповнення зони точкового зварювання, а також до витягування паяних з'єднань, як показано на рисунку 2.7.

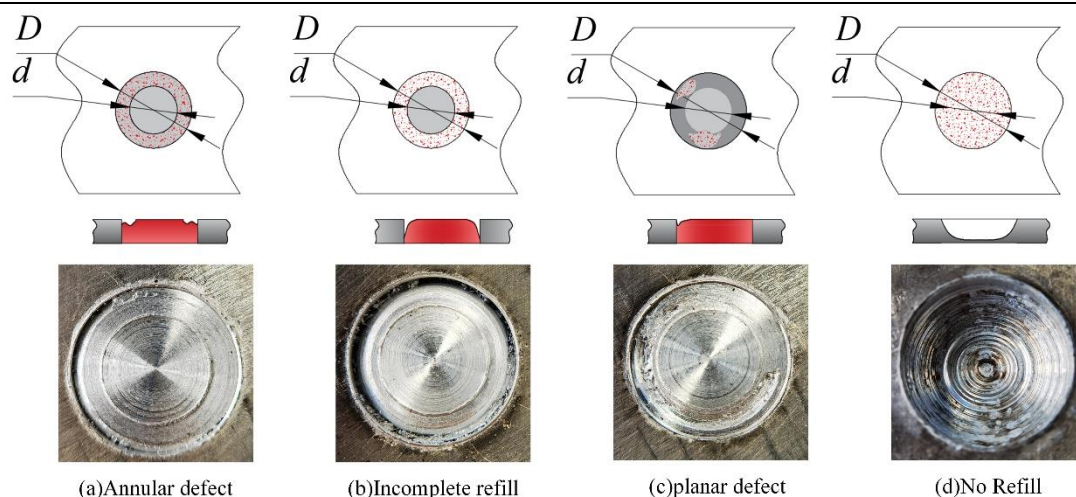


Рисунок 2.7 – Поверхневі дефекти в різних формах зони точкового зварювання

Згідно з аналізом, низька швидкість обертання легко призводить до недостатнього виділення тепла, і важко повністю розм'якчити метал у зоні точкового зварювання, що призводить до недостатнього заповнення зони точкового зварювання та дефектів, як показано на рисунку 2.7 (а) та (б), це явище дуже очевидне, коли діаметр перемішуючого інструменту невеликий. Коли швидкість обертання швидка, тепло буде занадто високим, внаслідок чого метал у зоні точкового зварювання сильно розм'якшується при високій температурі або навіть частково плавиться, і на поверхні мішалки легко утворюється металургійне з'єднання, прилипає до мішалки та обертається з високим ступенем, а потім залишає зону точкового зварювання з відходом мішалки, як показано на рисунку 2.8, такі параметри процесу схильні до поверхневих дефектів або відсутності заправки, як показано на рисунку 2.7 (с) та (d).



Рисунок 2.8 – Метал повністю витягується інструментом для перемішування

Відповідно до результатів експериментів, наведених у таблиці 2.6, для забезпечення повноти заповнення та гладкої поверхні зони точкового зварювання було обрано швидкість обертання $\omega = 1000 \text{ об/хв} \sim 1600 \text{ об/хв}$ та швидкість зварювання $v = 20 \text{ мм/хв} \sim 50 \text{ мм/хв}$, і на цій основі були проведені експерименти з точкового зварювання тертям з повним перетином та висувним перемішуванням, а конкретні параметри були встановлені, як показано в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Параметри процесу та відповідні їм налаштування

Параметр процесу	ω (об/хв)	v (мм/хв)	h (мм)	P (кН)	Діаметр стрижня
1	1000	20	4	7	$d=6$ $d=7$ $d=8$ $d=9$ $d=10$
2	1000	30			
3	1000	40			
4	1000	50			
5	1200	20			
6	1200	30			
7	1200	40			
8	1200	50			
9	1400	20			
10	1400	30			
11	1400	40			
12	1400	50			
13	1600	20			
14	1600	30			
15	1600	40			
16	1600	50			

Відповідно до діапазону параметрів процесу, наведених у таблиці 2.5, результати дослідних випробувань показують, що вищевказані параметри процесу дозволяють отримати добре сформовану зону ТЗТЗП, а її морфологія показана на рисунку 2.9.



Рисунок 2.9 – Типові макроморфології при різних діаметрах інструменту

2.7 Обладнання для випробувань та підготовка зразків

2.7.1 Розтягнення та зсув

Відповідно до розміру зразка ТЗТЗП, зразок закріплюється на випробувальній машині для випробування на розтягнення та зсув, а конкретний розмір зразка та положення затискача на випробувальній машині показано на рисунку 2.10.

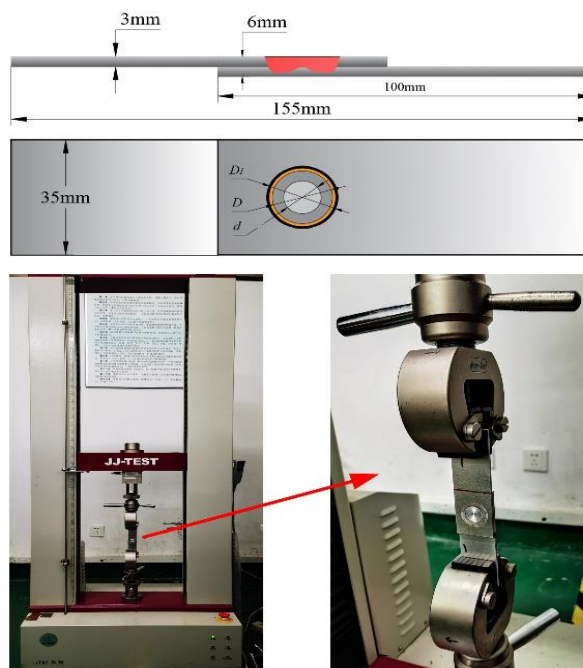


Рисунок 2.10 – Обладнання для випробування на розтягнення та зсув і розмір зразка

2.7.2 Твердість

Відповідно до розміру основної зони точкового зварювання тертям з перемішуванням, твердість верхньої поверхні зони точкового зварювання, розмір зразка поперечного перерізу та метод випробування показані на рисунку 2.11. Випробування твердості проводилося на приладі для вимірювання мікротвердості з інтервалом 0,5 мм для кожних двох точок вимірювання.

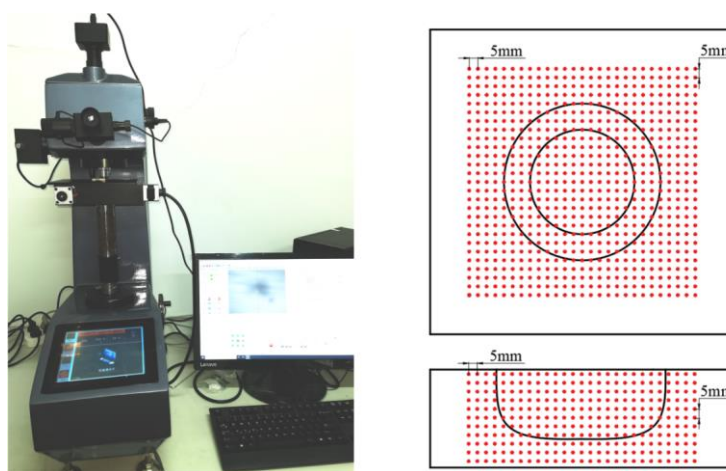


Рисунок 2.11 – Принципова схема випробування мікротвердості в зоні точкового зварного шва

2.7.3 Металографічна структура

Для того, щоб краще спостерігати закон течії металу, металографічні зразки полірували металографічним наждачним папером 320#, 600# та 1000#, а потім полірували водою на атласній тканині, нарешті відтирали та сушили спиртом, герметизували та консервували. Підготовлені зразки для спостереження розідали в корозійному розчині ($15\% \text{HCL} + 5\% \text{HNO}_3 + 1\% \text{HF} + 79\% \text{H}_2\text{O}$) протягом 15 ~ 25 с, а потім поміщали під металографічний мікроскоп для спостереження.

2.7.4 Характеристики втоми

Для проведення випробувань на втому використовується симетрична машина для випробувань на втому IBTC-2000 виробництва China Kaier Measurement and Control Technology Co, Ltd., період випробування становить 2 с, конкретний розмір зразка для випробувань на втому та форма силового навантаження показані на рисунку 2.12.

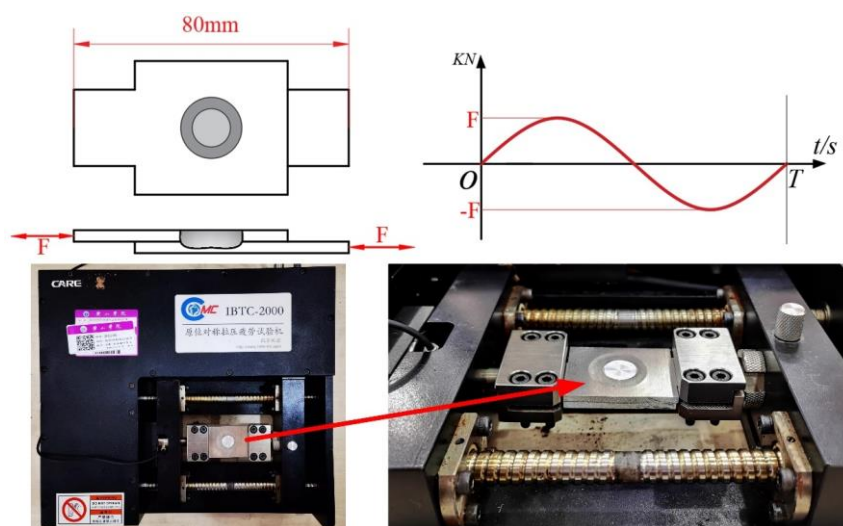


Рисунок 2.12 – Принципова схема випробування на втому симетрії

2.8 Висновки до розділу

У розділі представлено процес ТЗТЗП, параметри процесу та методи тестування продуктивності.

1. Алюмінієвий сплав 6061-T6 товщиною 3 мм, обраний в якості випробувального матеріалу для точкового зварювання в цій роботі, і на цій основі оптимізовані інструменти для перемішування діаметром від 6 мм до 10 мм.

2. Оптимізовано параметри процесу точкового зварювання з глибиною вставки 4 мм, часом попереднього нагрівання 3 секунди та часом стаціонарної витримки 3 секунди, а також проведено випробування точкового зварювання тертям з перемішуванням зі швидкістю обертання перемішуючого інструменту 1000 ~ 1600 об/хв та швидкістю вставки 20 ~ 50 мм/хв під різні діаметри.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ МІКРОСТРУКТУРИ ЗОНИ ТОЧКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

3.1 Передумови проведення дослідження

З технологічного процесу ТЗТЗП у попередньому розділі та попередніх випробувань можна зробити висновок, що метал у зоні точкового зварювання має великий пластичний потік у всьому процесі точкового зварювання, і тенденція його течії безпосередньо пов'язана з остаточною морфологією точкового зварювання та кінцевими характеристиками. Тому надзвичайно важливо вивчити поведінку пластичної течії металів у зоні точкового зварювання ТЗТЗП, щоб зрозуміти механізм формування зони точкового зварювання. Сучасні методи дослідження зосереджені в основному на металографічному аналізі мікроструктури зони точкового зварювання, а також на використанні металографічного мікроскопа та обладнання EBSD для спостереження та узагальнення розміру зерна, закону розподілу зерна та тенденції пластичної течії зони точкового зварювання, розуміння впливу різних діаметрів перемішувального інструменту на зону точкового зварювання та отримання з'єднання між верхньою та нижньою пластинами, що підлягають точковому зварюванню, що закладає міцний фундамент для подальшого аналізу його продуктивності.

3.2 Аналіз тепловиділення в зоні точкового зварювання

Дослідження показують, що розмір зерна, параметри процесу і діаметр перемішуючого інструменту суттєво впливають на формування і характеристики точкових зварних швів, зокрема на їх мікроструктуру. Ці фактори взаємопов'язані через їх вплив на пластичну деформацію металу та температуру в зоні зварювання, причому розподіл температури визначає поведінку пластичної деформації. Для кращого розуміння мікроструктури точкових зварних швів та вивчення впливу цих параметрів необхідно спочатку дослідити модель теплоутворення в зоні зварювання. Це дозволить теоретично

пояснити процес теплоутворення та створити основу для аналізу мікроструктури.

Контакт між перемішуючим інструментом і заготовкою під час стабілізації зварювання моделюється за допомогою теорії негерцового контакту кочення. Ця теорія, розроблена Калером з 1982 по 1992 рік, базується на енергетичному принципі пружної механіки і відмовляється від гіпотези Герца. Вона використовує статичний закон розподілу $P(r)$ як нормальний тиск в процесі точкового зварювання, як рівняння (3.1) [83-85].

(1) Рівномірний дотик

$$(1) P(r) = \frac{4N_0}{\pi(D^2 - d^2)} \quad (3.1)$$

N_0 — Інструмент для перемішування нормального тиску (N);

D — Діаметр гільзи для перемішування;

d — Діаметр перемішуючого стрижня.

Оскільки відношення діаметра мішалки до діаметра мішалки, що розглядається в цій статті, є фіксованим значенням 1,5, наведене вище рівняння (3.1) можна записати наступним чином.

$$P(r) = \frac{7.2N_0}{\pi D^2} \quad (3.2)$$

Стан перемішуючого інструмента і контакт між ним і заготовкою, що зварюється, показані на рисунку 3.1.

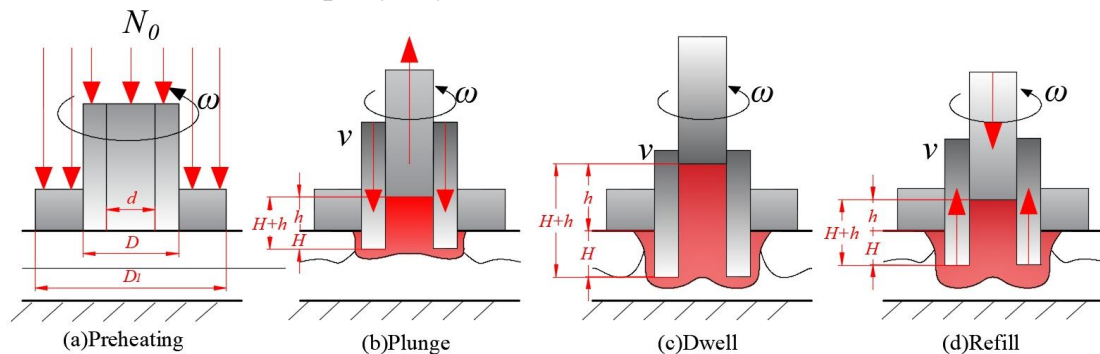


Рисунок 3.1 – Контактний зв'язок між інструментом для перемішування на різних етапах

Як видно з рисунку 3.1, зона тепловиділення ТЗТЗП в основному складається з тепловиділення Q_1 перемішуючої гільзи та тепловиділення Q_2 перемішуючого стрижня, а загальне тепловиділення $Q_{\text{заг}} = Q_1 + Q_2$. Для того, щоб спростити процес тепловиділення і розрахунку ТЗТЗП, для всього процесу тепловиділення зроблені наступні припущення:

1. Поверхня мішалки гладка, напруження зсуву рівномірно розподілене вздовж бічної поверхні;

2. Осі мішалки та гільзи вважаються перпендикулярними з рівномірним тиском;

3. Для спрощення розрахунку джерела тепла, контакт між перемішуючим інструментом і точково звареною пластиною може бути трансформований з рисунка 3.2 (а) на рисунок 3.2 (б). Тут синя жирна лінія позначає поверхню контакту при зсуві, а червона жирна лінія - поверхню контакту при надлишковому тиску.

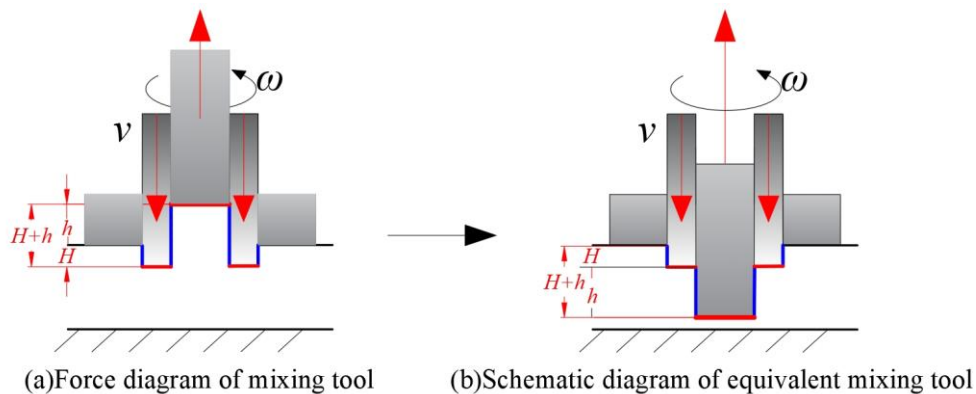


Рисунок 3.2 – Контактна взаємодія між перемішуючим інструментом і пластиною

Сила і швидкість перемішуючого інструменту в процесі точкового зварювання показані на рисунку 3.3.

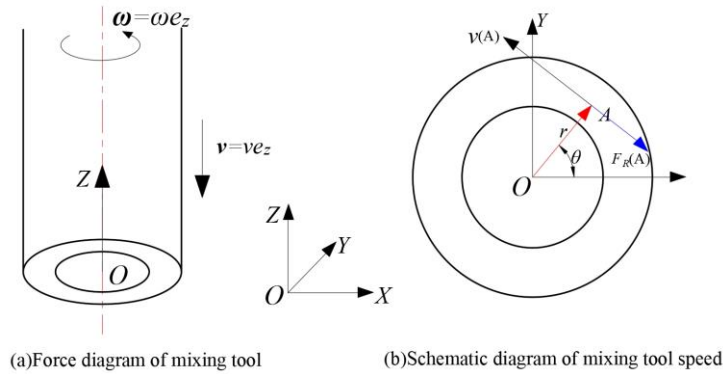


Рисунок 3.3 – Діаграма сили та швидкості інструмента

На етапі стабілізації точкового зварювання між точкою A перемішуючої гільзи і заготовкою виникають дві сили тертя, де тертя ковзання викликається перемішуючим інструментом, прикладеним до пластини, що зварюється, а в'язке тертя - це явище розм'якшення, що виникає при нагріванні металу і прилипає до перемішуючого інструменту, а перемішуючий інструмент визначається як $F_R(A)$ в його результуючій силі тертя.

$$F_R(A) = F_k(A) + F_\mu(A) \quad (3.3)$$

Де:

$F_k(A)$ — Сила тертя ковзання;

$F_\mu(A)$ — в'язке тертя.

Класична кулонівська модель контакту використовується для розрахунку тертя ковзання і сили адгезії на основі кулонівського тертя.

$$F_k(A) = -kp(A) \frac{v(A)}{|v(A)|}, \quad F_\mu(A) = -\mu v(A) |v(A)|^{m-1} \quad (3.4)$$

Де:

k — Коефіцієнт тертя ковзання; Sliding friction factor;

μ — Експериментальний коефіцієнт в'язкого опору в залежності від форми інструменту;

Експериментальний коефіцієнт в'язкого опору в залежності від форми

інструменту;

m —коефіцієнт впливу v на в'язке тертя.

Швидкість точки A описується рівнянням 3.5.

$$v(A) = \omega_o r \cos \theta e_y - \omega_o r \sin \theta e_x + v e_z \quad (3.5)$$

Де:

θ — Кут між OX і $|OA|$.

Можна бачити, що сила тертя ковзання в точці A визначається рівнянням (3.6).

$$F_k(A) = F_{kx}(A) + F_{ky}(A) + F_{kz}(A) \quad (3.6)$$

Серед них

$$F_{k-XY}(A) = kP(A)\omega_o r, \quad F_{k-Z}(A) = kP(A)v$$

$$F_k(A) = kP(A)\omega_o r + kP(A)v = kP(A)(\omega_o r + v) \quad (3.7)$$

Сила адгезійного тертя в точці A інструменту за формулою (3.8).

$$F_\mu(A) = -\mu[(\omega_o r)^m + v^m] \quad (3.8)$$

На сторону перемішуючого інструменту в основному впливає зворотний момент тертя, викликаний точковим зварюванням основного металу, і його силова діаграма показана на рисунку 3.4, а сторона перемішуючої гільзи і перемішуючого стрижня можуть бути представлені цією діаграмою.

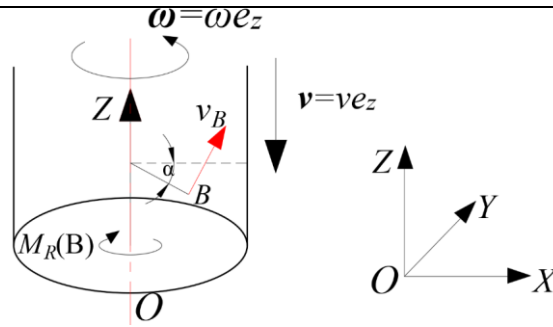


Рисунок 3.4 – Діаграма сили та швидкості інструменту

У стабільному процесі точкового зварювання між перемішуючим інструментом і заготовкою, що зварюється, створюються два моменти тертя: тертя ковзання і в'язкого тертя, а також комбінований момент, який в цей час визначається за формулою (3.9).

$$M_R(B) = M_k(B) + M_\mu(B) \quad (3.9)$$

Де:

$M_k(B)$ — момент тертя ковзання в точці В інструмента;

$M_\mu(B)$ — момент в'язкого тертя в точці В на інструменті.

Класична модель кулонівського контакту використовується для розрахунку моменту тертя ковзання на основі кулонівського тертя як рівняння (3.10).

$$M_k(B) = -kp(B) \frac{OB \times v(B)}{|v(B)|} \quad (3.10)$$

Де:

k — Коефіцієнт тертя ковзання;

$p(B)$ — Нормальний тиск в точці В на інструменті;

$v(B)$ — швидкість в точці В на інструменті.

Коли матеріал заготовки стає пластичним через підвищення температури в зоні контакту, виникає момент в'язкого тертя, який визначається за формулою (3.11).

$$M_\mu(B) = -\mu OB \times v(B) |v(B)|^{m-1} \quad (3.11)$$

Де:

μ — Експериментальний коефіцієнт в'язкого опору в залежності від форми інструменту.

Як показано на рисунку 3.5, можна побудувати модель швидкості точки В:

$$v(B) = \omega_o R_1 \cos \theta e_y - \omega_o R_1 \sin \theta e_x + v e_z \quad (3.12)$$

Видно, що сила тертя ковзання в точці В дорівнює:

$$F_k(B) = F_{kX}(B) + F_{kY}(B) + F_{kZ}(B) \quad (3.13)$$

Серед них

$$F_{k-XY}(B) = kP(B)\omega_o R_1, \quad F_{k-Z}(B) = kP(B)v$$

$$F_k(B) = kP(B)\omega_o R_1 + kP(B)v = kP(B)(\omega_o R_1 + v) \quad (3.14)$$

Крутний момент в'язкого тертя в точці В інструмента становить:

$$F_\mu(A) = -\mu \left[(\omega_o R_1)^m + v^m \right] \quad (3.15)$$

Оскільки перемішуючий інструмент завжди знаходиться в контакті з точково звареною пластиною, а всередині пластини немає іншого джерела тепла, і більша частина перехідного одновимірного поширення тепла також існує всередині твердого тіла, рівняння нагріву має вигляд:

$$dQ = \omega dM = \omega r dF \quad (3.16)$$

$$dQ_{1k} = \omega r F_k(A) r d\theta dr, \quad dQ_{1\mu} = \omega r F_\mu(A) d\theta dr \quad (3.17)$$

де:

dQ_{1k} — Тертя ковзання, що виникає в точці А на гільзі, генерує тепло;

$dQ_{1\mu}$ — тепло виробляється за рахунок в'язкого тертя в точці А на гільзі.

Якщо проінтегрувати наведену вище формулу, верхню і нижню межі якої можна побачити на рисунку 3.3 від 0 до $D/2$, де D - діаметр гільзи, то тепло, що генерується тертям ковзання і в'язким тертям в точці А, буде виглядати наступним чином:

$$Q_{1k} = k\omega \int_0^{\frac{D}{2}} \int_0^{2\pi} P(r)(\omega_0 r + v)r^2 dr d\theta, \quad Q_{1\mu} = -\mu\omega \int_0^{\frac{D}{2}} \int_0^{2\pi} [(\omega_0 r)^m + v^m] r dr d\theta \quad (3.18)$$

Для того, щоб розрахувати тепловиділення сторони мішалки, що обертається навколо центральної осі, візьмемо за приклад точку не мінімального перерізу В зони нагріву на стороні мішалки, зону нескінченно малого відрізка $dB = dB = R_1 d\alpha dh$, а момент одностороннього тертя $MR(B)$, де dh - одиничний елемент у напрямку Z . Цей відрізок має нескінченно малий момент тертя ковзання $dM = Mk(B)dB$ і в'язкого тертя $dM = M\mu(B)dB$, і згідно з рівняннями (3.16) і (3.19) можна зробити висновок, що теплота, яка виділяється в точці В, визначається рівнянням (3.19).

$$dQ_{2k} = \omega M_k(B) R_1 d\alpha dh, \quad dQ_{2\mu} = \omega M_\mu(B) R_1 d\alpha dh \quad (3.19)$$

Припускаючи, що вплив швидкості v на в'язке тертя є нелінійним ($m=2$), оскільки висота проникнення перемішуючого інструменту всередину точково звареної пластини є рівномірною, наприклад, максимальна глибина проникнення перемішуючої гільзи всередину пластини дорівнює H , а мінімальна - 0, тому за глибину проникнення приймається середнє значення $H/2$, те ж саме справедливо і для перемішуючого стрижня. Тепло, що

генерується моментом тертя ковзання і моментом в'язкого тертя всієї сторони мішалки, отримують шляхом інтегрування:

$$Q_{2k} = k\omega_0 \int_0^{\frac{H+h}{2}} \int_0^{2\pi} P(h)(\omega_0 r + v)r^2 d\alpha dh, \quad Q_{2k} = 3.6N_0 k\omega_0 (H+h)(\omega D + 2v) \quad (3.20)$$

$$Q_{2\mu} = -\mu\omega_0 \int_0^{\frac{H+h}{2}} \int_0^{2\pi} [(\omega_0 r)^m + v^m] r d\alpha dh, \quad Q_{2\mu} = \frac{-\mu\omega_0 (H+h)(D^3\omega_0^2 + 4v^2 D)}{8} \quad (3.21)$$

Загальне тепловиділення інструменту для перемішування $Q_{\text{заг}} = Q_{1k} + Q_{2k} + Q_{1\mu} + Q_{2\mu}$, в цьому процесі глибина вставки H гільзи фіксується на рівні 4 мм, висота підйому стрижня фіксується на рівні 5 мм, а нормальна сила N фіксується на рівні 7 кН. Коефіцієнт тертя ковзання $k = 0,2$ для спрощення розрахунків. Коефіцієнт опору в'язкості $\mu = 0,3$. конкретний вираз виглядає наступним чином:

$$Q_{\text{total}} = 1400\omega_0 \left[\frac{7.7\omega_0 D^2}{32} + \frac{7.7vD}{12} + 0.0324(\omega_0 D + 2v) \right] + 0.3\omega_0 \left[\pi \left(\frac{\omega_0 D^4}{8} + \frac{v^2 D^2}{4} \right) + \frac{0.009(D^3\omega_0^2 + 4v^2 D)}{8} \right] \quad (3.22)$$

Оскільки загальна тривалість точкового зварювання обернено пропорційна швидкості проплавлення, рівняння (3.23) можна переписати наступним чином.

$$Q_{\text{total-in}} = 1400\omega_0 \left[\frac{7.7\omega_0 D^2}{32v} + \frac{7.7D}{12} + 0.0324(\omega_0 D v^{-1} + 2) \right] + 0.3\omega_0 \left[\pi \left(\frac{\omega_0 D^4}{8v} + \frac{v D^2}{4} \right) + \frac{0.009(D^3\omega_0^2 v^{-1} + 4vD)}{8} \right] \quad (3.23)$$

Згідно з наведеним вище рівнянням (3.34), теоретичне теплове

навантаження при різних параметрах процесу може бути розраховане більш чітко, при цьому не потрібно точно отримувати значення теплового навантаження, залежність між питомим значенням теплового навантаження і параметрами процесу показана на рисунку нижче.

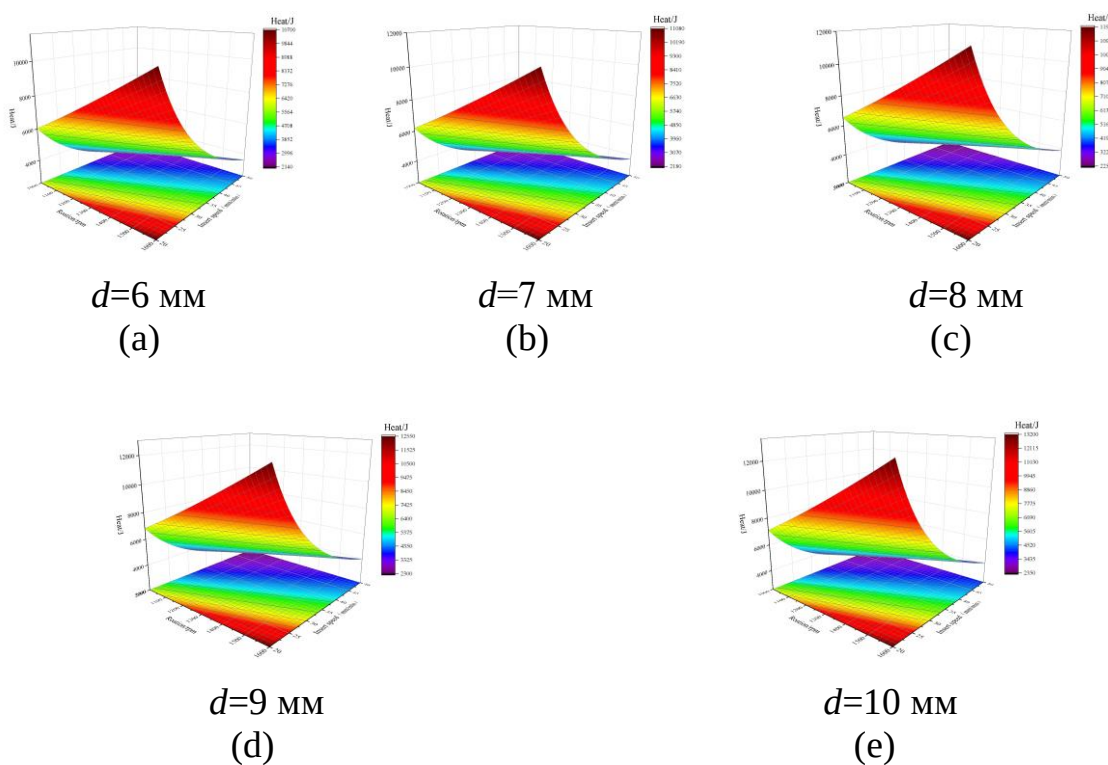


Рисунок 3.5 – Діаграма розподілу теплових витрат в залежності від параметрів процесу

На рисунку 3.6 показано, що тепловіддача зменшується зі збільшенням швидкості прохода і зменшенням швидкості обертання. Для одного і того ж діаметру перемішуючого інструменту ця тенденція до зниження є відносно стабільною, але стає більш вираженою зі збільшенням діаметру інструменту. Зокрема, зменшення тепловиділення за рахунок швидкості проходки зростає з 63% до 70%, тоді як зменшення за рахунок швидкості обертання зростає з 37% до 45%. Це свідчить про те, що швидкість проникнення має більший вплив на тепловиділення, ніж швидкість обертання.

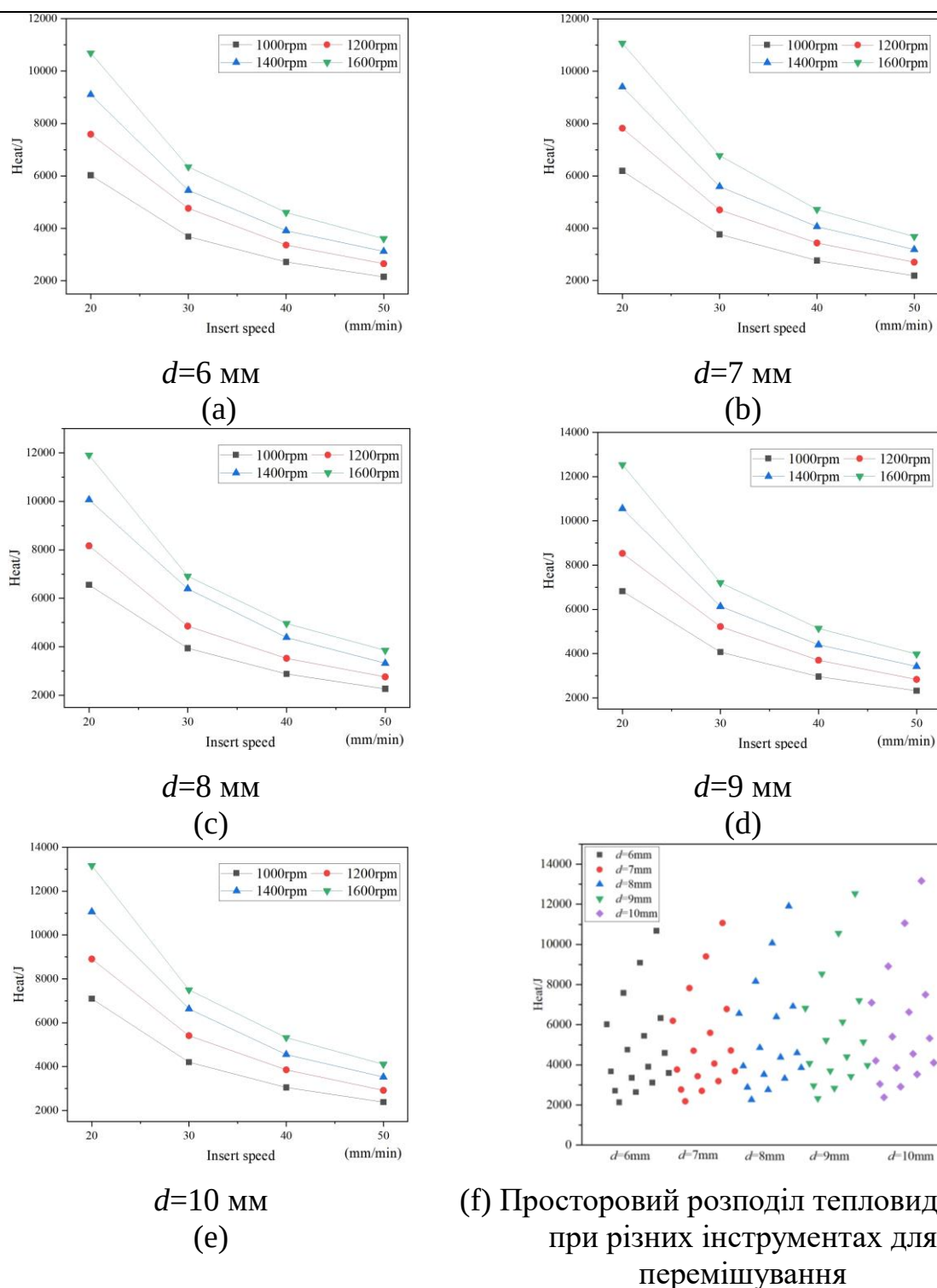


Рисунок 3.6 – Теоретичний аналіз виробництва тепла при різних параметрах процесу

Це явище чітко вказує на те, що швидкість проплавлення є найбільш значущим фактором, що впливає на тепловіддачу в зоні точкового зварювання,

за умови використання одного і того ж перемішуючого інструменту. Мінімальна швидкість проплавлення і максимальна швидкість обертання забезпечують найбільше тепловиділення. На рисунку 3.6 (f) показано, що діаметр перемішуючого інструменту також впливає на тепловіддачу, особливо на максимальне значення. Однак, більший діаметр не завжди призводить до максимального тепловиділення. Наприклад, мішалка діаметром 6 мм може виробляти більше максимальне теплове навантаження, ніж будь-яке значення, крім максимального, для мішалок діаметром 7 мм і 8 мм. Аналогічно, інструмент діаметром 8 мм може виробляти більше максимального теплового потоку, ніж будь-яке значення, крім максимального, для інструментів діаметром 9 мм і 10 мм. Хоча діаметр інструменту впливає на максимальну теплову потужність, він не є достатньою умовою. Оптимальне тепловідведення вимагає більшого діаметру інструменту, меншої швидкості проникнення та більшої швидкості обертання, що є важливими умовами.

3.3 Макроскопічний аналіз морфології зони ТЗТЗП

Відповідно до методів випробувань та параметрів процесу, описаних у вищезазначених розділах, існують подібності та відмінності в морфології зони точкового зварювання, що утворюється інструментами для перемішування різного діаметру, і зона точкового зварювання в основному дещо більша за зону перемішування, а макроскопічна відмінність відображається в розмірі зони точкового зварювання та увігнутій і опуклій морфології поверхні.

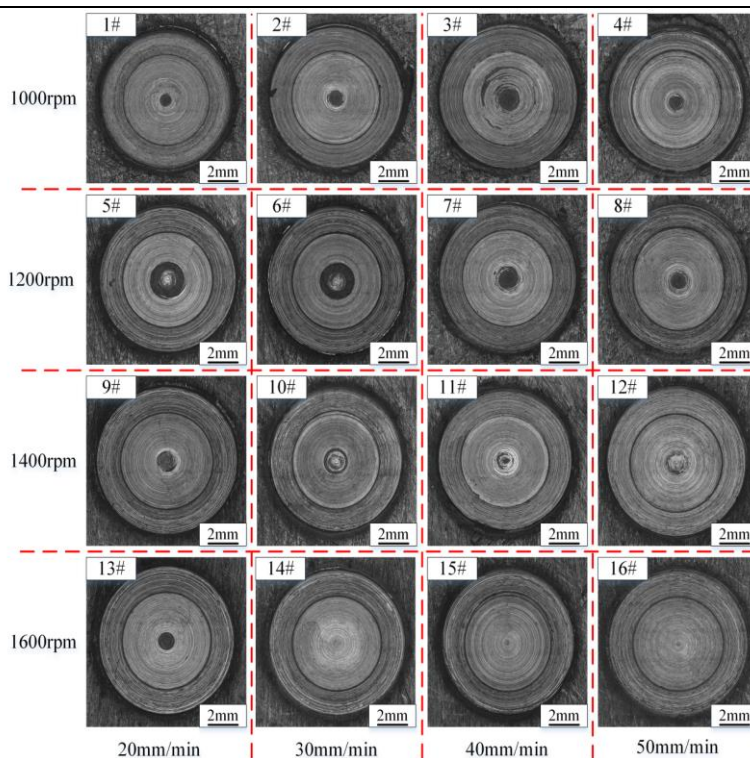


Рисунок 3.7 – Макроструктура точкового зварювання при різних параметрах процесу при $d=6\text{мм}$

Як видно з рисунка 3.7, при швидкості обертання $\omega = 1000 \sim 1600\text{об/хв}$, швидкості проплавлення $v=20\sim30\text{мм/хв}$ і перемішувальному інструменті $d = 6\text{мм}$, зона точкового зварювання з достатнім заповненням може бути сформована при різних параметрах процесу, а максимальний діаметр зони точкового зварювання в основному збігається з діаметром перемішуючого інструменту. Коли швидкість обертання не перевищує 1200об/хв , центральна зона точкового зварювання схильна до очевидних точкових заглиблень, глибина яких становить від $0,2$ до $0,45\text{мм}$, а максимальний діаметр - $2,2\text{мм}$, як показано на зразках 5 # і 6 # на рисунку 3.7.

При 1000об/хв зі збільшенням швидкості проникнення діапазон дефектів розширюється, утворюючи дугоподібні смуги, як показано на зразку 3# на рисунку 3.7, Збільшення швидкості обертання і проникнення значно зменшує ці дефекти. Вищі швидкості обертання перемішуючого інструменту збільшують тепловіддачу в зоні точкового зварювання, підвищуючи тангенціальну швидкість металу. Це краще розм'якшує метал, сприяючи

отриманню більш гладкої поверхні точкового зварювання.

Оскільки тепло зменшується в міру віддалення від центру обертання, більш високі температури можуть викликати адгезію між перемішувачем і металом. Тангенціальна швидкість металу в центрі зони точкового зварювання низька, і коли інструмент виходить, частина металу забирається, утворюючи точковий дефект. Це явище слабшає зі збільшенням тангенціальної швидкості, що пояснює, чому дефект виявляється тільки в центрі. При достатньому нагріванні збільшення швидкості проплавлення зменшує загальний тепловий вплив і адгезію, що призводить до більш гладкої поверхні точкового зварювання. Ось чому точковий дефект зникає зі збільшенням швидкості проплавлення при швидкості обертання 1600 об/хв.

Зі збільшенням діаметра перемішувача збільшується його відносна тепловіддача, що покращує теплопередачу в зону точкового зварювання. Це також збільшує тангенціальну швидкість металу, покращуючи перемішування і формуючи кращу поверхню точкового зварювання. На рисунку 3.8 показано характеристики поверхні при перемішуванні інструментом діаметром 7 мм. Він показує, що хороша поверхня точкового зварювання може бути досягнута за різних умов, лише з кількома незначними точковими дефектами. Зокрема, при швидкості обертання 1400 об/хв і вище утворюється гладка, бездефектна поверхня точкового зварювання при різних швидкостях проплавлення, як видно на зразках від 25 до 32 на рисунку 3.8.

Зі збільшенням діаметра перемішувача зростає тепловкладення і тангенціальна швидкість металу при тих же параметрах процесу. Це сприяє утворенню гладкої, бездефектної поверхні точкового зварювання. На рисунку 3.9 показано, що гладка і рівна поверхня точкового зварювання досягається при діаметрі перемішувача 8 мм, незалежно від параметрів процесу.

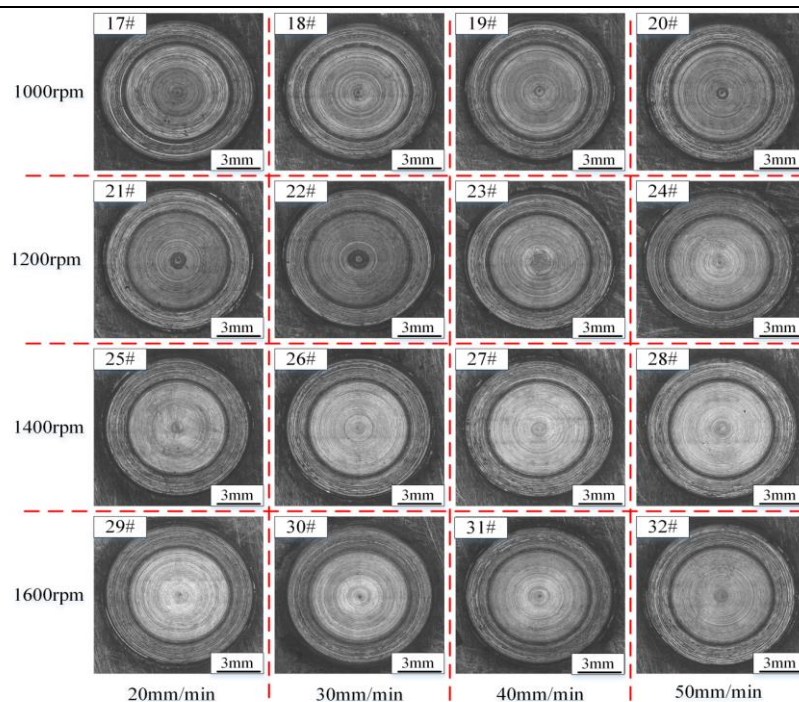


Рисунок 3.8 – Макроструктура точкового зварювання при різних параметрах процесу при $d = 7$ мм

Коли перемішуючий стрижня $d = 9$ мм, зі збільшенням швидкості обертання, тепловіддача зони точкового зварювання має тенденцію до насичення, в цей час метал при високій температурі легко прилипає до перемішуючого інструменту, але завдяки великому діаметру перемішуючого інструменту, коли швидкість обертання висока, він все ще має достатню тангенціальну швидкість, щоб вийти з мішалки, тобто коли швидкість обертання $\omega = 1200$ об/хв, утворюються більш очевидні точкові дефекти, а коли швидкість обертання ще більше підвищується, тангенціальна швидкість металу збільшується, і причина, чому точкові дефекти поступово зникають. Як показано на рисунку 3.10.

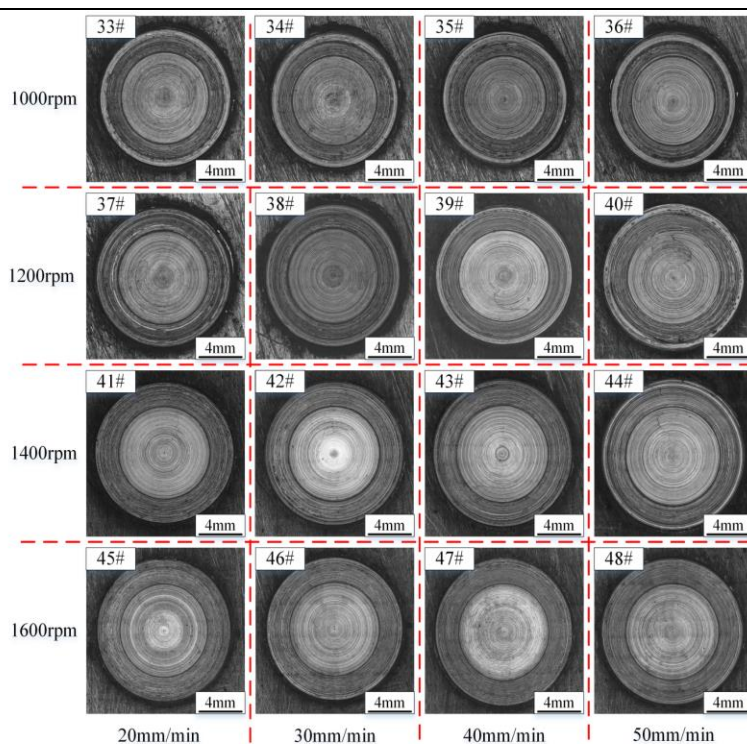


Рисунок 3.9 – Макроструктура точкового зварювання при різних параметрах процесу при $d = 8$ мм

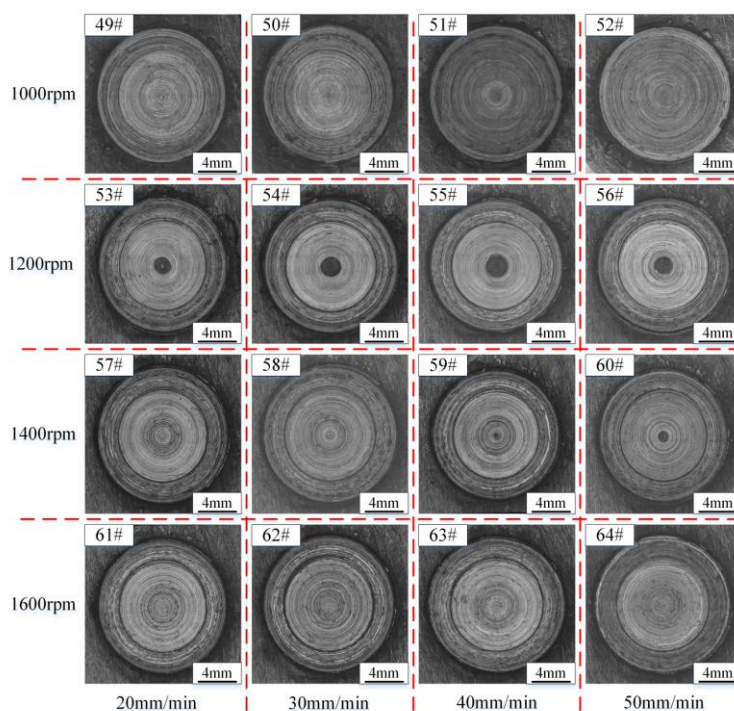


Рисунок 3.10 – Макроструктура точкового зварювання при різних параметрах процесу при $d = 9$ мм

Як показано на рисунку 3.11, видно, що при діаметрі перемішуючого інструменту $d = 10\text{мм}$, при швидкості обертання менше 1600 об/хв , може бути сформована зона точкового зварювання з гладкою і рівною поверхнею, і не утворюються точкові дефекти, при швидкості обертання $\omega = 1600\text{ об/хв}$ спостерігається очевидна втрата металу з утворенням поверхневих дефектів, а зі збільшенням швидкості проплавлення поверхневі дефекти поступово зменшуються, при швидкості проплавлення 50 мм/хв поверхневі дефекти повністю зникають, а поверхня зони точкового зварювання стає гладкою і рівною. Аналіз показує, що це пов'язано з великим діаметром перемішувального інструменту та великою тангенціальною швидкістю розм'якшення металу, хоча метал має високу температуру, він також важко прилипає до поверхні перемішувального інструменту і все одно може утворювати хорошу поверхню зони точкового зварювання. Коли швидкість обертання $\omega = 1600\text{ об / хв}$, тепловіддача зони точкового зварювання в цей час найбільша, температура металу в безпосередньому контакті з перемішуючим інструментом занадто висока, легко провести локальне плавлення і сформувати металургійний зв'язок між перемішуючим інструментом, при швидкісному обертанні перемішуючого інструменту і поступово відокремитися від металу з більш низькою температурою, що призводить до великого дефекту поверхні, коли швидкість проникнення становить 50 мм / хв , через короткий час всього процесу точкового зварювання тепловіддача відносно невелика, і місцеве зварювання під тиском буде вироблятися в майбутньому, щоб сформувати металургійну зв'язку. Таким чином, може бути сформована хороша і гладка поверхня точкового зварювання, як показано на зразку $77\text{ \#} \sim 80\text{ \#}$ на рисунку 3.11.

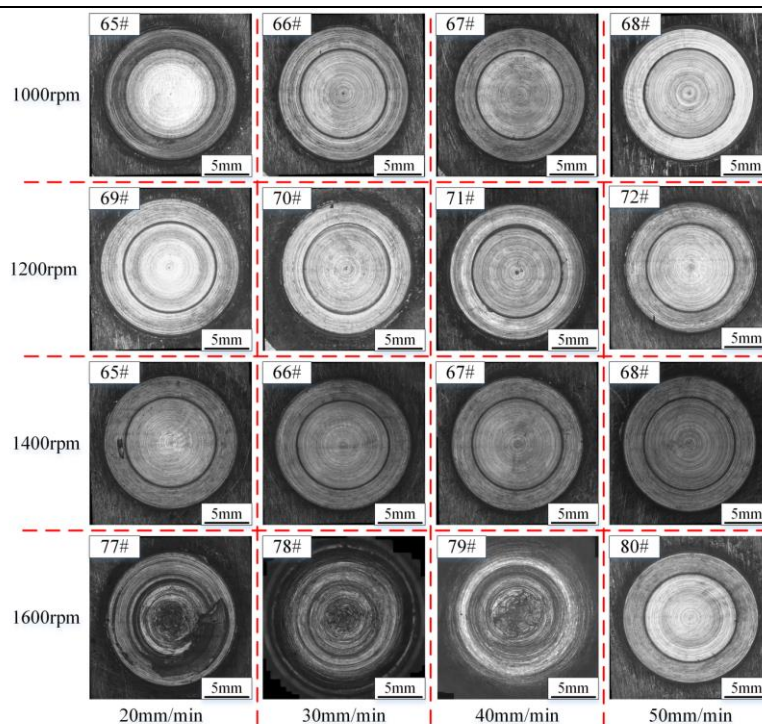


Рисунок 3.11 – Макроструктура точкового зварювання при різних параметрах процесу при $d = 10$ мм

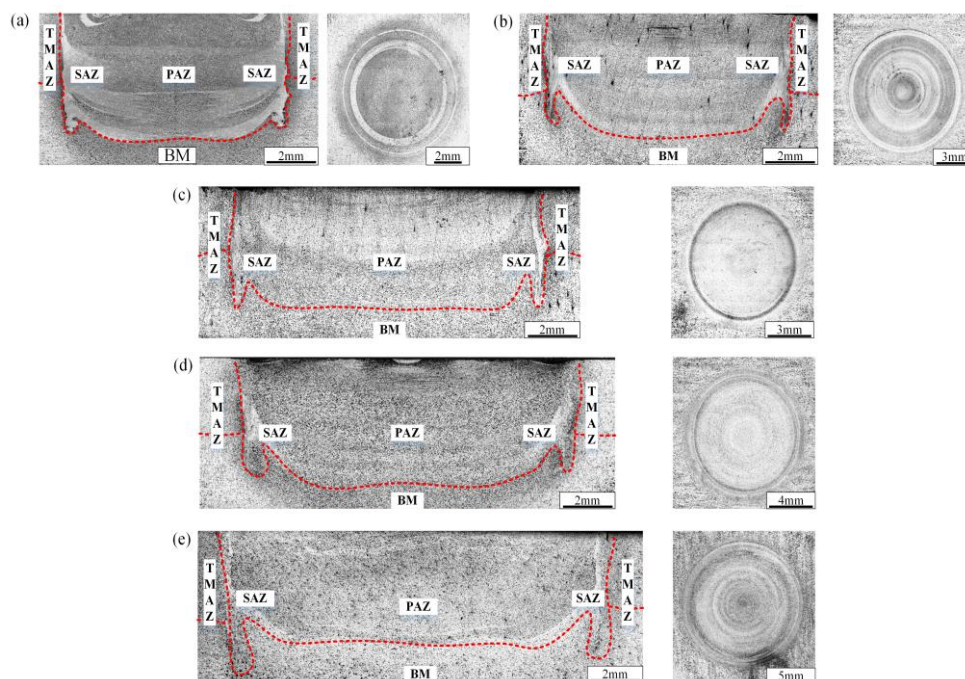
З наведених вище зображень та аналізу видно, що при використанні інструменту для натягування $d = 6$ мм ~ 10 мм, швидкості обертання $\omega = 1000$ об/хв ~ 1600 об/хв та швидкості проникнення $v = 20$ мм/хв ~ 50 мм/хв, ТЗТЗП може бути добре виконано для формування ефективної зони точкового зварювання, а діаметр зони точкового зварювання еквівалентний діаметру інструменту для натягування.

На якість поверхні зони точкового зварювання в основному впливають тепловіддача і тангенціальна швидкість металу, які взаємно обмежені. Низька теплова потужність призводить до поганої пластичності металу, викликаючи дугоподібні або центральні дефекти. Надмірне підведення тепла може призвести до локального розплавлення і зчеплення між інструментом і металом, яке відокремлюється під час руху інструменту, утворюючи поверхневі дефекти. Малі діаметри інструменту спричиняють піттинг, тоді як великі діаметри призводять до більш виражених поверхневих дефектів.

3.4 Мікроскопічний аналіз зони ТЗТЗП

3.4. 1 Мікроскопічний аналіз загальної морфології

Як видно з рисунка 3.12, діаметр різних перемішуючих інструментів може утворювати зону точкового зварювання без явних внутрішніх дефектів при різних параметрах процесу, а зона точкового зварювання в основному має форму "U", її ширина трохи більша за діаметр перемішуючого інструменту, а глибина в основному така ж, як глибина проникнення перемішуючого інструменту, яку в основному можна розділити на зону впливу перемішуючого стрижня (ЗВПГ), зону впливу перемішувальної гільзи (ЗВПВ) та зону впливу термомеханічного ефекту (ЗВТД), серед яких зона впливу перемішуючого стрижня (ЗВПГ) та зона впливу гільзи (ЗВПВ). Її можна спільно назвати зоною перемішування (ЗС). Поділ зони точкового зварювання тут не обійшовся без зони термічного впливу (ТВ), яка обов'язково присутня, однак через малу ширину зразка, використаного в даній роботі, межа між зоною термічного впливу та іншими зонами є нечіткою, тому вона не виділяється як окрема зона.



(a) – $d = 6$ мм; (b) – $d = 7$ мм; (c) – $d = 8$ мм; (d) – $d = 9$ мм; (e) – $d = 10$ мм

Рисунок 3.12 – Типова макроскопічна морфологія зони точкового зварювання

Як показано на рисунку 3.13, під час високошвидкісного проникнення обертового перемішуючого інструменту між інструментом і основним металом утворюється циліндрична область високотемпературного металу з тим же діаметром, що і перемішуючий стрижень (рисунк 3.13(a)). При вході в стадію заповнення гільза піднімається, а перемішуючий стрижень притискається донизу, миттєво видавлюючи і деформуючи циліндричний метал. Метал біля основного матеріалу тече до нижньої частини гільзи, утворюючи миттєвий потік "перевернутого гриба" (рис. 3.13 (b)), причому рухливість потоку зменшується зі збільшенням відстані від центру обертання. Оскільки зовнішній край гільзи є найвіддаленішим від центру зварювання, металу потрібно найдовше часу, щоб досягти цієї області. Якщо вчасно не подати достатню кількість металу, основний метал під високим тиском і високою температурою може проникати вгору під гільзу, утворюючи «крапельну зону». Зі зменшенням діаметра мішалки відстань між металом і зовнішньою гільзою скорочується, зменшуючи як ширину, так і глибину крапельної зони. Коли процес заповнення триває, метал у формі перевернутого гриба поступово контактує з основним металом під зовнішньою гільзою, завершуючи заповнення і формуючи повністю заповнену зону зварювання.

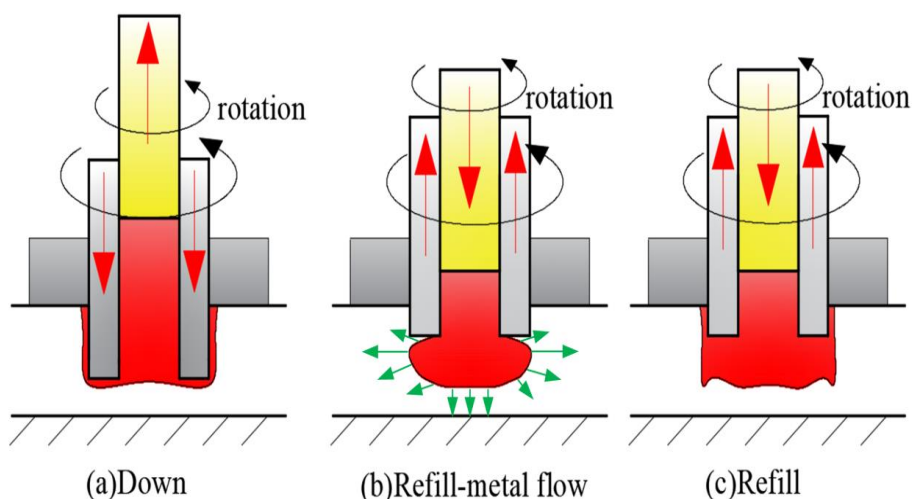


Рисунок 3.13 – Схематичне зображення основної морфології зони точкового зварювання

3.4.2 Мікроскопічна морфологія лінії межі між верхньою та нижньою

пластинами в зоні точкового зварювання за використання різних інструментів для перемішування

Лінія перетину між верхньою та нижньою пластинами демонструє різний ступінь кривизни в точці, де вона майже зникає. Це явище спеціально називають дефектом «Hook» («гачок»). Кут Ψ характеризує напрям кривизни цього «гачка» відносно лінії перетину верхньої та нижньої пластин, при цьому проти годинникової стрілки вважається позитивним. Рисунки 3.14 – 3.18 ілюструють морфологію «гачка» при різних параметрах процесу.

Узагальнюючи, можна сказати, що верхня та нижня пластини, які підлягають точковому зварюванню, можуть бути ефективно зварені при різних діаметрах інструмента для перемішування. Лінія з'єднання верхньої та нижньої пластин поступово зникає у зоні термомеханічного впливу (ЗТВ), тоді як характер вигину лінії у ЗТВ визначається температурою, діаметром інструмента для перемішування та параметрами процесу. Загалом, при меншому діаметрі інструмента лінія з'єднання у ЗТВ більш схильна вигинатися вгору, що пояснюється недостатнім тепловкладом у зону точкового зварювання. У цьому випадку інструмент під час стадії повторного заповнення забезпечує достатнє тепловиділення для розм'якшення навколишнього металу, внаслідок чого лінія з'єднання верхньої та нижньої пластин зазнає вигину в ЗТВ.

Із збільшенням діаметра інструмента для перемішування, при невеликій швидкості занурення, зона точкового зварювання, як правило, формується у вигляді вертикального вдавлювання з увігнутою верхньою пластиною та опуклою нижньою пластиною. При підвищенні швидкості занурення морфологія змінюється на вертикальне вдавлювання з опуклою верхньою пластиною та увігнутою нижньою пластиною.

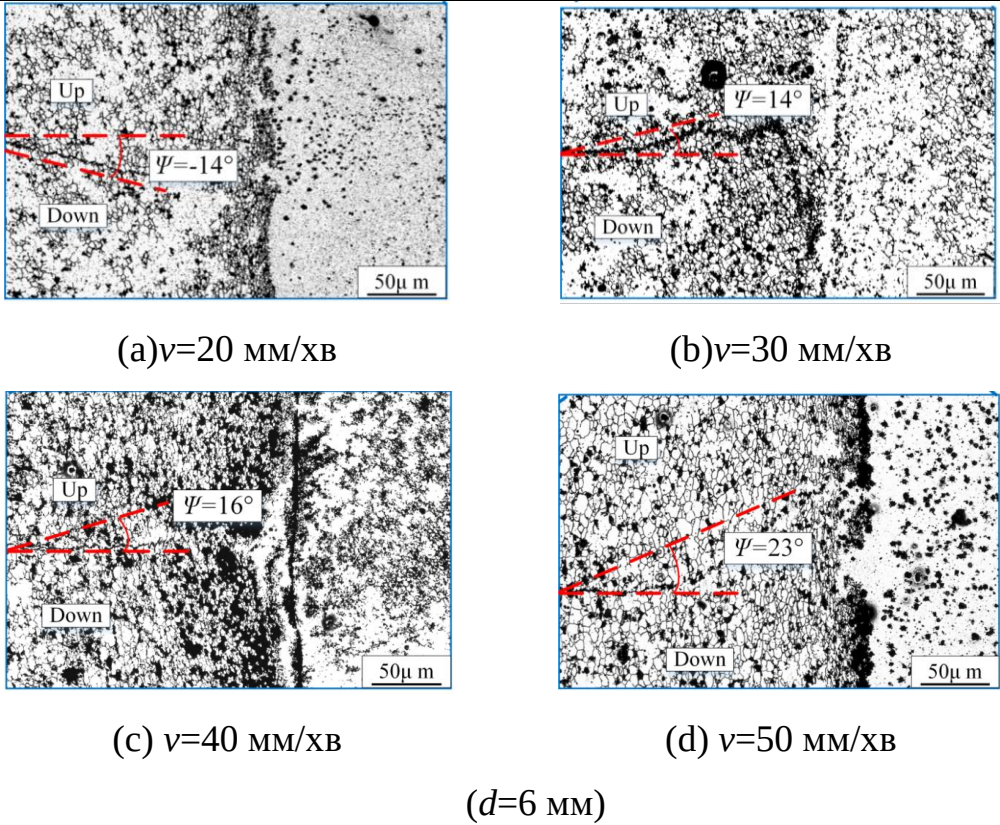


Рисунок 3.14 – Морфологія «гачка»

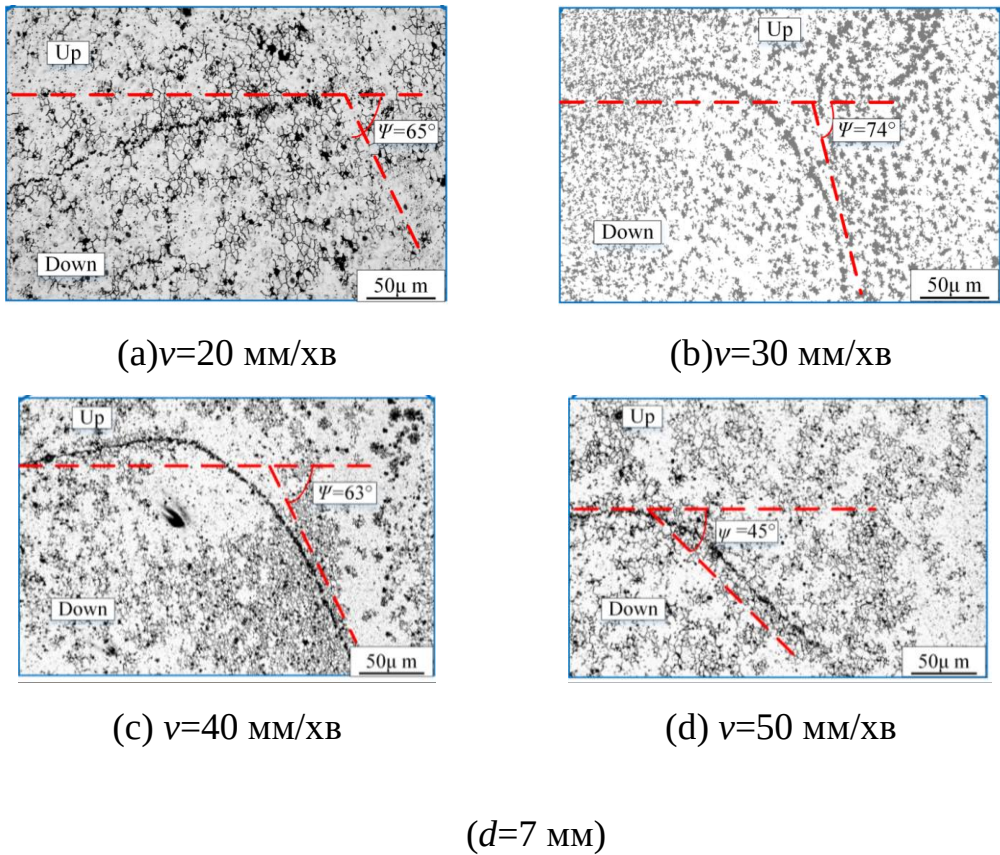
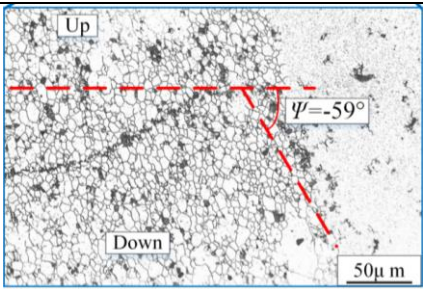
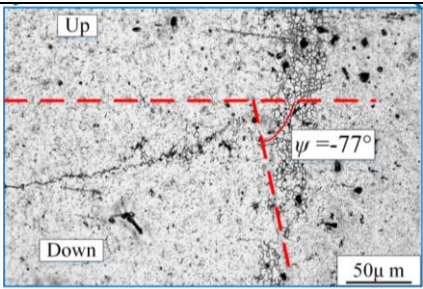


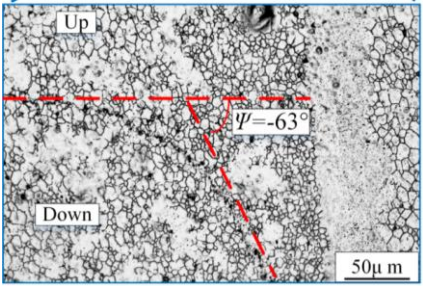
Рисунок 3.15 – Морфологія «гачка»



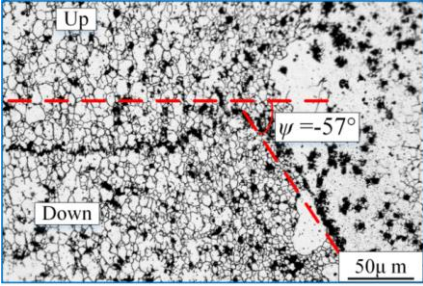
(a) $v=20$ мм/хв



(b) $v=30$ мм/хв



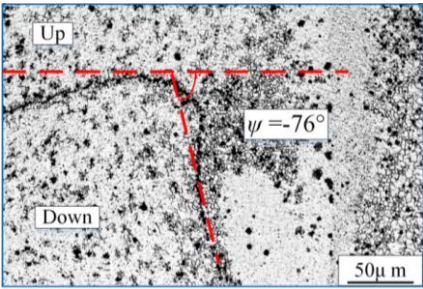
(c) $v=40$ мм/хв



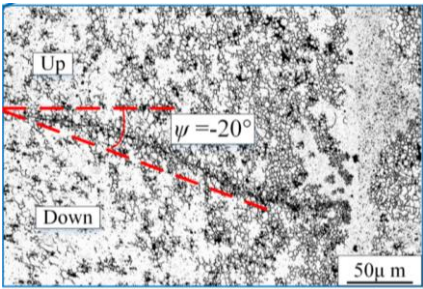
(d) $v=50$ мм/хв

($d=8$ мм)

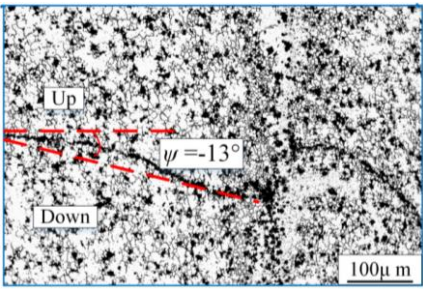
Рисунок 3.16 – Морфологія «гачка»



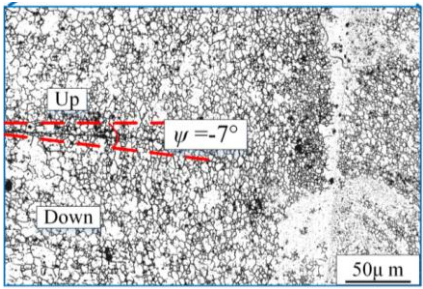
(a) $v=20$ мм/хв



(b) $v=30$ мм/хв



(c) $v=40$ мм/хв



(d) $v=50$ мм/хв

($d=9$ мм)

Рисунок 3.17 – Морфологія «гачка»

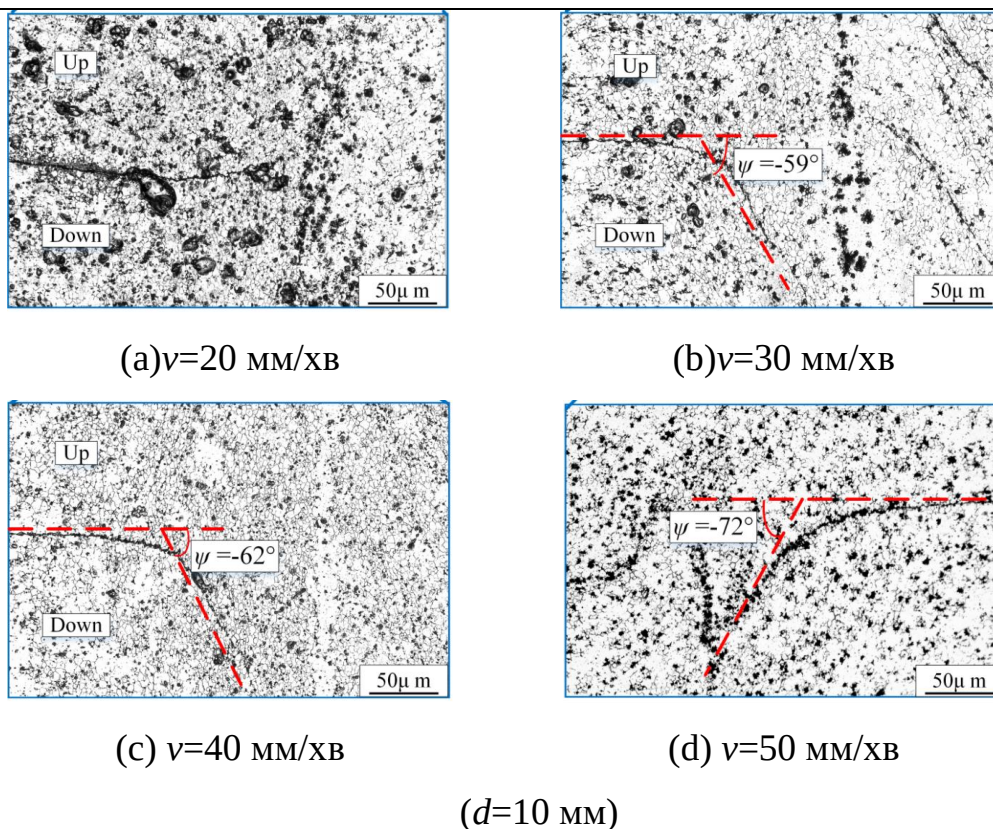


Рисунок 3.18 – Морфологія «гачка»

3.4.3 Мікроскопічна топографія дна зони точкового зварювання

Дві нижні сторони зони зварювання є зоною, де перемішуючий інструмент має найдовший час контакту з основним металом, що зварюється, особливо під час зупинки, перемішуюча гільза в цій зоні і основний метал тривалий час повністю перемішуються, утворюючи тут "крапельну зону", а також найвіддаленішу точку потоку металу у формі "перевернутого гриба". Тому ступінь заповнення і напрямок течії металу в цій зоні є ключовими факторами для визначення рівня формування шва при тертєвому перемішувальному зварюванні.

Як видно з рисунка 3.19, існують очевидні відмінності в мікроструктурі між двома нижніми сторонами зони точкового зварювання і основним металом при різних діаметрах перемішуючого інструменту, але є і схожість, тобто основна характеристика полягає в тому, що він вставляється в зону точкового зварювання під нахилом, і його зовнішній контур показує характеристики

вигину зовні і прямий всередині, що поступово стає очевидним зі збільшенням перемішуючого інструменту. При цьому при діаметрі перемішуючого інструменту $d = 6$ мм в його зоні з'являється отвір розміром близько 20 мкм.

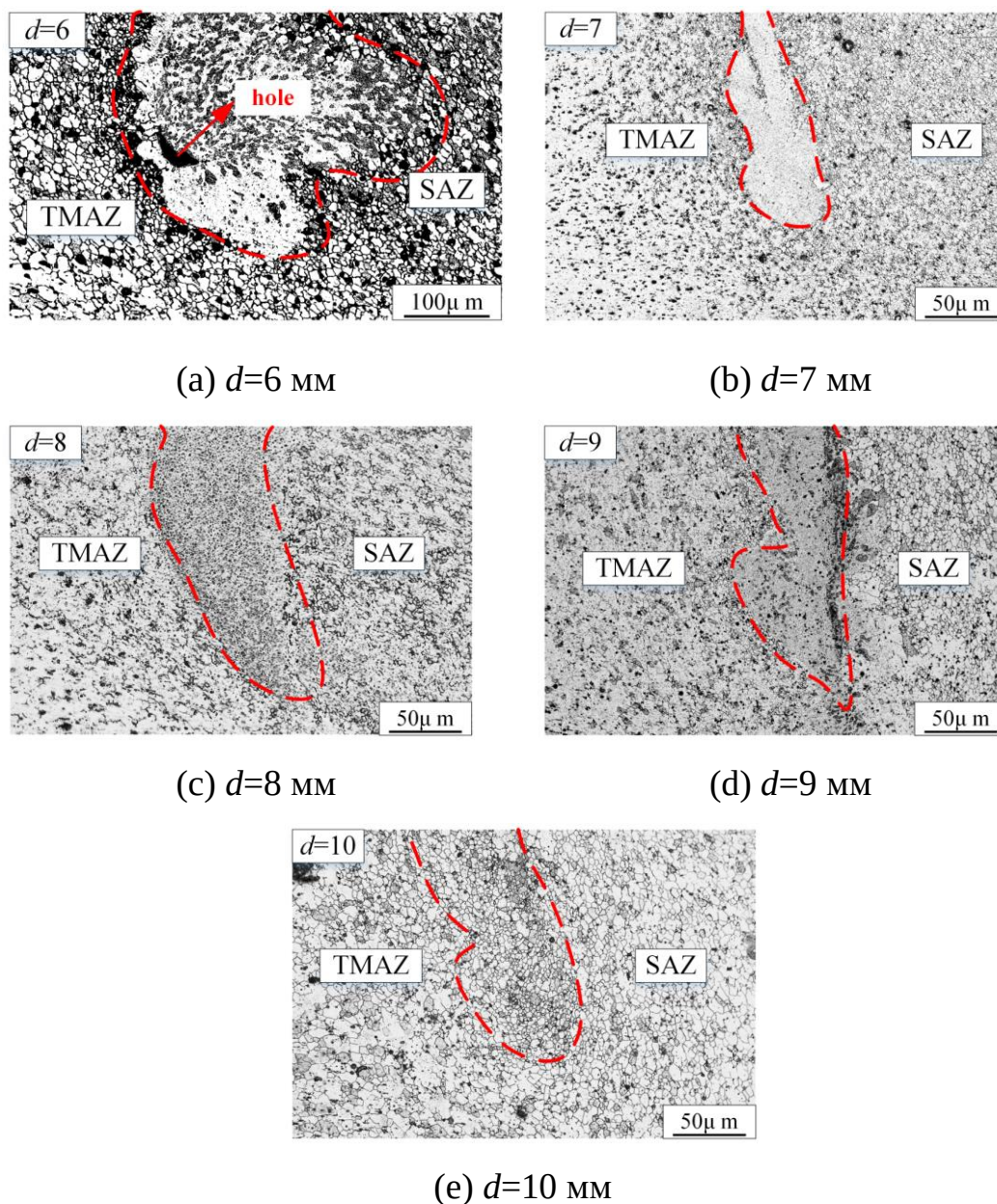


Рисунок 3.19 – Мікроструктура і морфологія обох сторін зони точкового зварювання

Згідно з аналізом, мішалка у вищезгаданій зоні постійно обертається з високою швидкістю під час стадії стаціонарної обробки, створюючи достатню температуру і приводячи сусідній метал у високошвидкісний рух, а також утворюючи "крапельну зону" в цьому положенні. Коли інструмент для перемішування невеликий, утворення кільцевих порожнин відбувається через

поступове зменшення пропускної здатності високотемпературного металу "перевернутий гриб" під час процесу заправки, і важко повністю заповнити порожнину, що утворюється після виходу з мішалки під обмеженою пропускною здатністю, а потім утворити порожнину, що також доводить, що пластичний метал безпосередньо під стрижнем для перемішування представляє форму потоку "перевернутого гриба".

3.4.4 Мікроскопічна морфологія зонм ТМАЗ різних перемішуючих інструментів

Зона ТМАЗ під подвійним впливом механічної дії та температури, і розташований на зовнішній стороні зони впливу перемішуючої гільзи, а також близько до основного металу, і форма потоку металу та морфологія мікроструктури цієї зони значною мірою визначають ступінь зв'язку між зоною ТЗТЗП та основним металом, що є важливою зоною для вивчення фізичної міцності зони ТЗТЗП.

Високошвидкісне обертання інструмента для перемішування та висока температура, що ним генерується, створюють навколо нього чітко виражену зону термомеханічного впливу, яка має помітну межу як із зону перемішування, так і з основним металом, як показано на рисунку 3.20. Напрямок зерен у зоні термомеханічного впливу загалом збігається з напрямом зерен у зоні перемішування. Це пояснюється тим, що при відведенні інструмента для перемішування безпосередньо під ним утворюється миттєва порожнина, а «перевернутий грибоподібний» високотемпературний метал під перемішувальним стрижнем потребує певного часу, щоб дістатися межі між інструментом та основним металом. У результаті виникає значна різниця в температурі та швидкості течії металу в зоні стику, що зрештою формує більш виражену «зону з'єднання типу тертя-заклепка» (friction plug riveting bonding zone), яка показана на рисунку пунктирною червоною лінією.

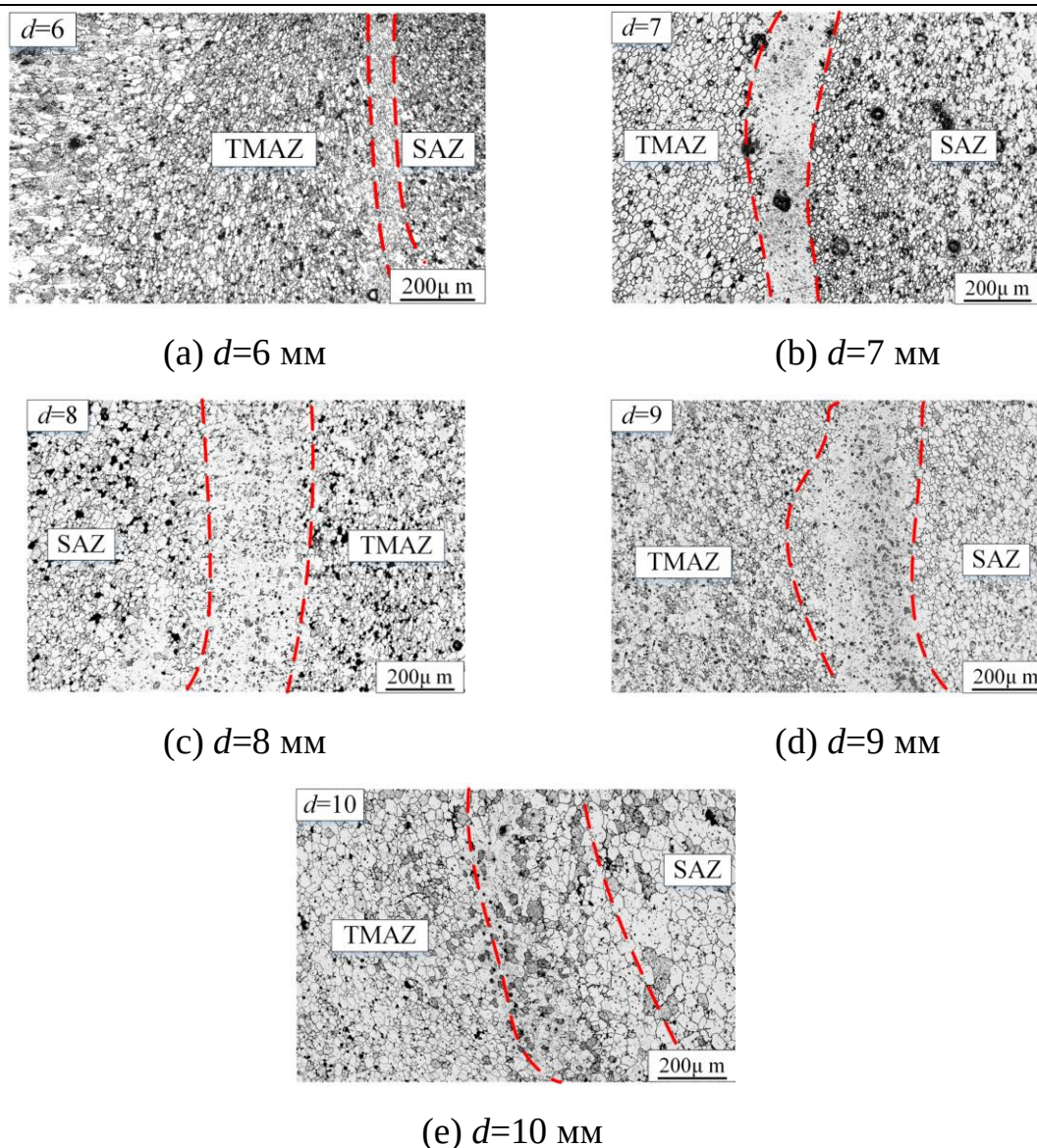


Рисунок 3.20 – Морфологія шва в зоні ЗТВ

На рисунку 3.20 показані значні мікроструктурні відмінності між зоною термомеханічного впливу (ЗТВ) та зоною перемішування (ЗП), особливо з обох боків при видавлюванні матеріалу, що має певні аналогії з процесом екструзії «зони з'єднання шляхом видавлення матеріалу при зварюванні тертям». Це пояснюється тим, що ЗП безпосередньо зазнає дії зусилля та температури інструмента для перемішування, тоді як ЗТВ піддається нижчим температурам і лише непрямому механічному впливу. Перехід зусиль між цими зонами є різким: у ЗТВ за межами зони видавлення матеріалу спостерігається раптове

зниження зусилля, зона «екструзії», яка безпосередньо контактує з інструментом, зазнає найбільшого навантаження, тоді як внутрішня зона ЗП – проміжного. Це зумовлює чіткі мікроструктурні відмінності в цих близько розташованих ділянках.

Крім того, зона «екструзії» є останньою, що заповнюється під час зварювання, і формується металом високої температури, який видавлюється під дією перемішувального стрижня та з'єднується з ЗТВ за рахунок тертя. Її пізніше формування й особливий механізм зумовлюють відмінну мікроструктуру порівняно з навколишніми зонами.

Для детальнішого вивчення мікроструктури зони було застосовано метод електронної дифракції зворотно розсіяних електронів (EBSD) у сканувальному електронному мікроскопі (SEM), як показано на рис. 3.21. З метою усунення хибних меж, зумовлених орієнтаційним шумом, було використано порогове значення розорієнтації у 2° [86].

На рисунку 3.21 показано, що зерна у «зоні з'єднання шляхом «екструзії» і при зварюванні тертям», яка розташована на межі між ЗТВ та ЗП, є повністю та рівномірно подрібненими й помітно меншими, ніж у прилеглих ділянках. Ця закономірність зберігається при різних діаметрах інструменту для перемішування. При менших діаметрах інструмента орієнтація зерна в цій зоні рівномірна; зі збільшенням діаметра орієнтація стає більш невпорядкованою, хоча розмір зерна залишається меншим, ніж з обох боків. Це свідчить про те, що метал у цій зоні не тільки руйнується під дією прямого перемішування, але й сильно стискається під час засипання. У момент контакту з ЗТВ круговий зсув від обертового інструменту ще більше інтенсифікує рух металу. Це впливає як на внутрішній ЗП, так і на зовнішній ЗТВ, причому зовнішній ЗТВ зазнає більшого впливу. Через мінімальну різницю температур між цими близькими ділянками розподіл за розміром зерна показує більші зерна з боків і дрібніші зерна в середині, що безпосередньо пов'язано зі зміною механічних сил.

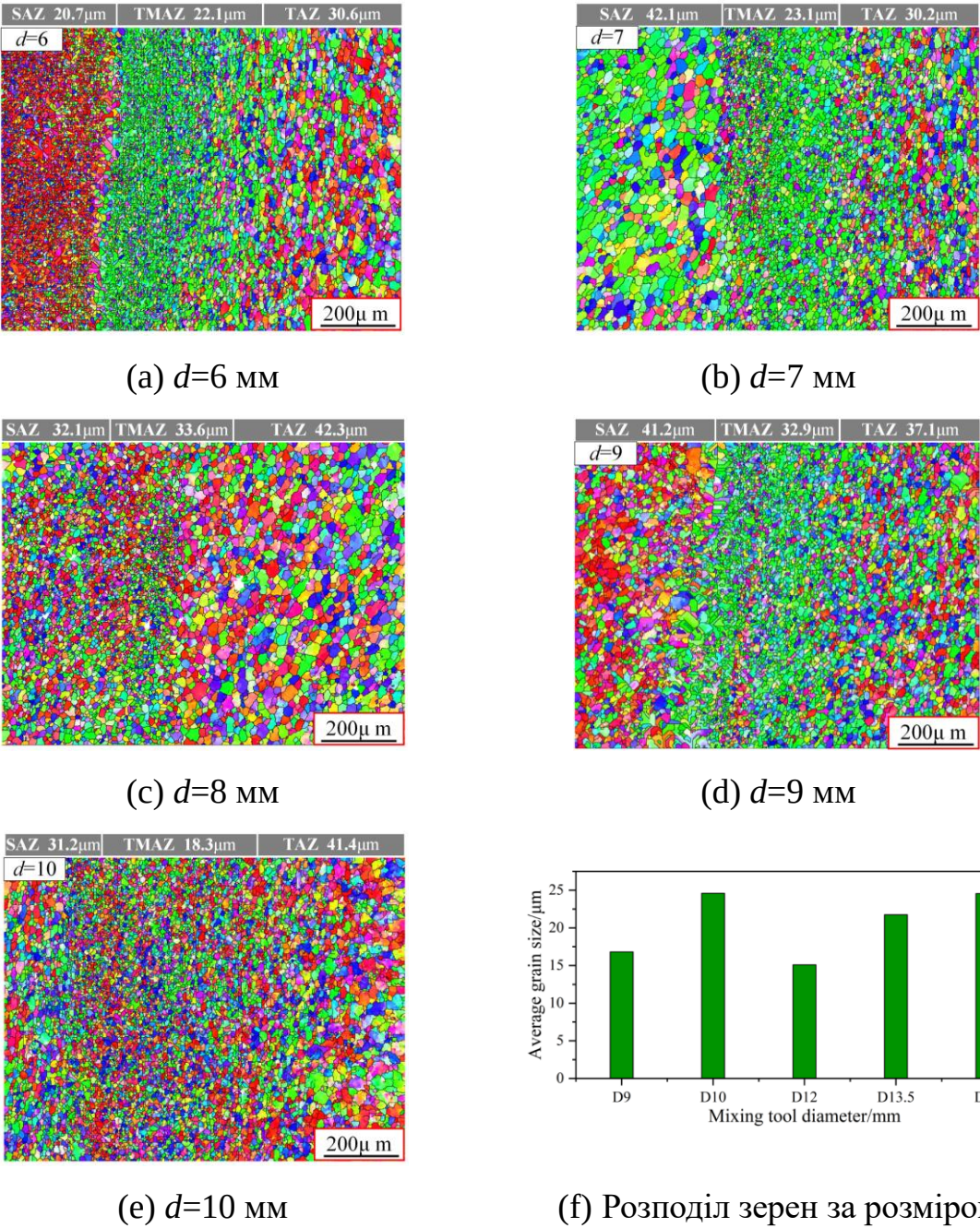


Рисунок 3.21 – Мікроструктура і морфологія ТМАЗ під впливом різних інструментів для перемішування

Рисунок 3.22 ілюструє рекристалізовані субзерна, що утворилися після руйнування зерен при високих температурах. На зображенні (а), поблизу «зони зчеплення екструзії при терті з перемішуванням» з великою механічною силою, видно багато субзерен, тоді як на зображенні (б), з центру зони перемішування, де механічні зусилля слабші, показує більші зерна та меншу кількість субзерен

[87-89].

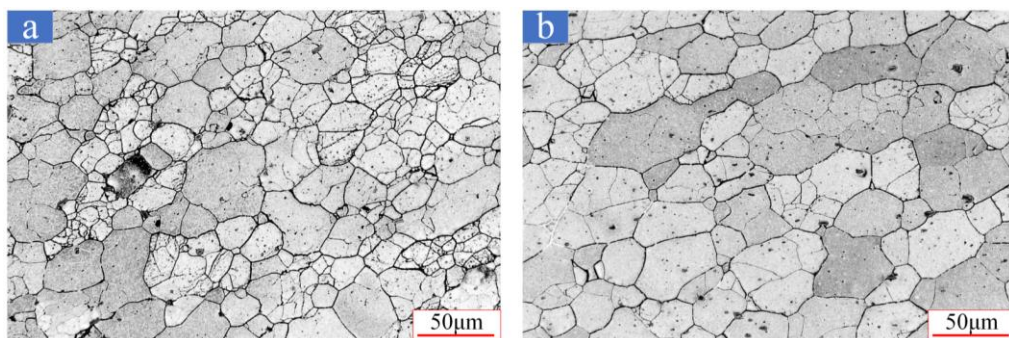


Рисунок 3.22 – Розподіл субкристалів

3.4.5 Морфологія ЗВГ при використанні різних перемішувальних інструментів

Нижня частина ЗВГ розташована в найнижчій частині всієї зони ТЗТЗП і також зазнає впливу як механічної екструзії, так і температури, що загалом подібно до зони термомеханічного впливу. Проте очевидною відмінністю є те, що механічне зусилля в цій зоні переважно зумовлене осьовим тиском, який виникає під час занурення інструмента для перемішування, та екструзійною силою, створюваною потоком металу на стадії повторного заповнення. Водночас глибина цієї зони визначає максимальну здатність шва ТЗТЗП до проплавлення та є межею між нижньою частиною зони перемішування (ЗП) і основним металом. Тому детальне вивчення цієї зони дає змогу краще зрозуміти зчеплення між зоною точкового зварювання та основним металом, а також механізм формування з'єднання.

Нижня частина ЗВГ, яка безпосередньо контактує з гільзою, має найбільшу лінійну швидкість і є місцем, де процес повторного заповнення металом починається найраніше. У цій зоні також відбувається витримка перемішувальної гільзи, що призводить до накопичення значної кількості тепла, яке стимулює адгезійний рух металу вздовж гільзи. На початковій стадії повторного заповнення метал у цій ділянці раптово втрачає нормальний тиск і циркулярне зсувне навантаження від гільзи, утворюючи низьконапірну порожнину. Навколишній метал під високим тиском переміщується вгору, щоб заповнити цю порожнину, зіштовхуючись із металом, який витісняється перемішувальним стрижнем, що спричиняє різке зниження швидкості потоку.

У міру подальшого заповнення рух сповільнюється, і формується характерна трикутна зона, показана на рисунку 3.23.

Ця трикутна ділянка збільшується в розмірах і стає крутішою зі зростанням діаметра інструмента, з'являючись симетрично з обох боків, утворюючи на нижній частині шва «дископодібне кільце» у перерізі. На обох боках цього кільця чітко спостерігається подрібнення зерен, тоді як усередині формуються грубіші зерна внаслідок зіткнення та зварювання дифузії під тиском основного металу та металу, витісненого стрижнем. Саме тут відбувається накопичення металу та ріст зерен при високій температурі.

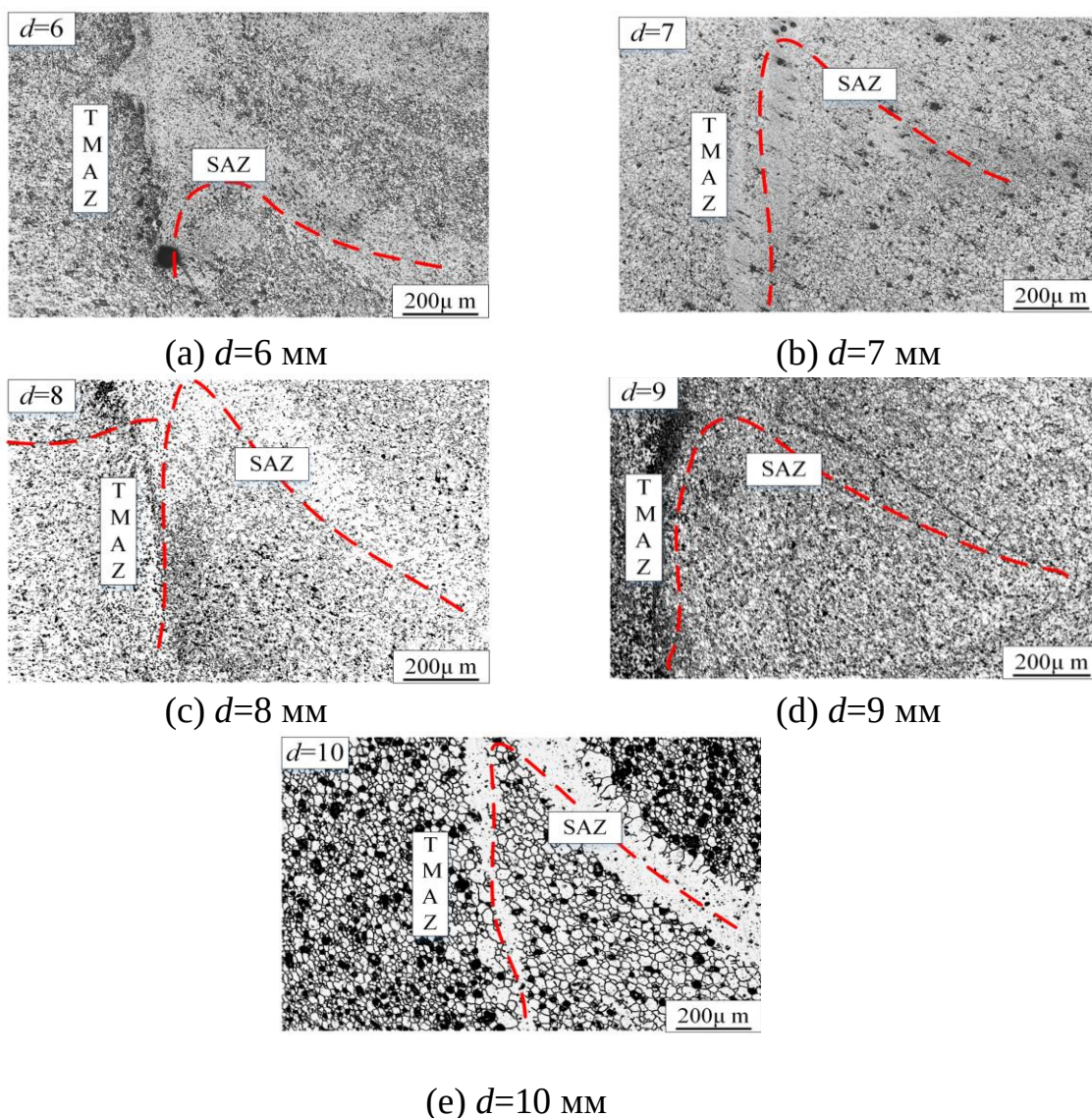


Рисунок 3.23 – Морфологія мікроструктури в нижній частині ЗВПВ

3.4.6 Мікроморфологія зони ЗВГ при використанні різних інструментів для перемішування

Зона впливу стрижня для перемішування в основному зосереджена в

центрі всієї зони точкового зварювання і проходить через всю зону точкового зварювання, а ступінь потоку металу нижча, ніж у зоні впливу перемішуючої гільзи, і немає великого поперечного міграційного потоку, а в основному відбувається поздовжній потік. Оскільки ця зона проходить через всю зону точкового зварювання, отже, вона є основною несучою зоною всієї зони точкового зварювання до зовнішнього навантаження, і металографічну структуру цієї зони можна вивчити, щоб зрозуміти несучу здатність зони ТЗТЗП.

Метал у зоні впливу перемішувального стрижня зазнає дії осьового стиску та високої температури інструмента для перемішування й слідує за стрижнем, здійснюючи осьові рухи вгору та вниз. Тому діаметр і швидкість занурення перемішувального стрижня мають найбільш суттєвий вплив на характер руху. На рисунку 3.24 показано розподіл зерен за різних діаметрів інструмента для перемішування та різних швидкостей занурення, з якого видно, що зерна подрібнені без очевидних дефектів, а метал під час повторного заповнення розділений і ущільнений. З точки зору різних інструментів для перемішування: зі збільшенням діаметра інструмента розмір зерен спочатку зростає, а потім зменшується; мінімальний розмір зерен спостерігається при найменшому діаметрі інструмента, тоді як найбільший – при діаметрі 8 мм. Щодо швидкості занурення: більша швидкість забезпечує кращий ефект подрібнення зерен, причому це явище найвиразніше при мінімальному діаметрі інструмента, але зі збільшенням його діаметра ефект поступово слабшає, аж поки зовсім не зникає.

Для подальшого пояснення причини цього явища було проаналізовано SEM-зображення типової зони впливу перемішувального стрижня при різних діаметрах інструмента для перемішування, як показано на рисунку нижче.

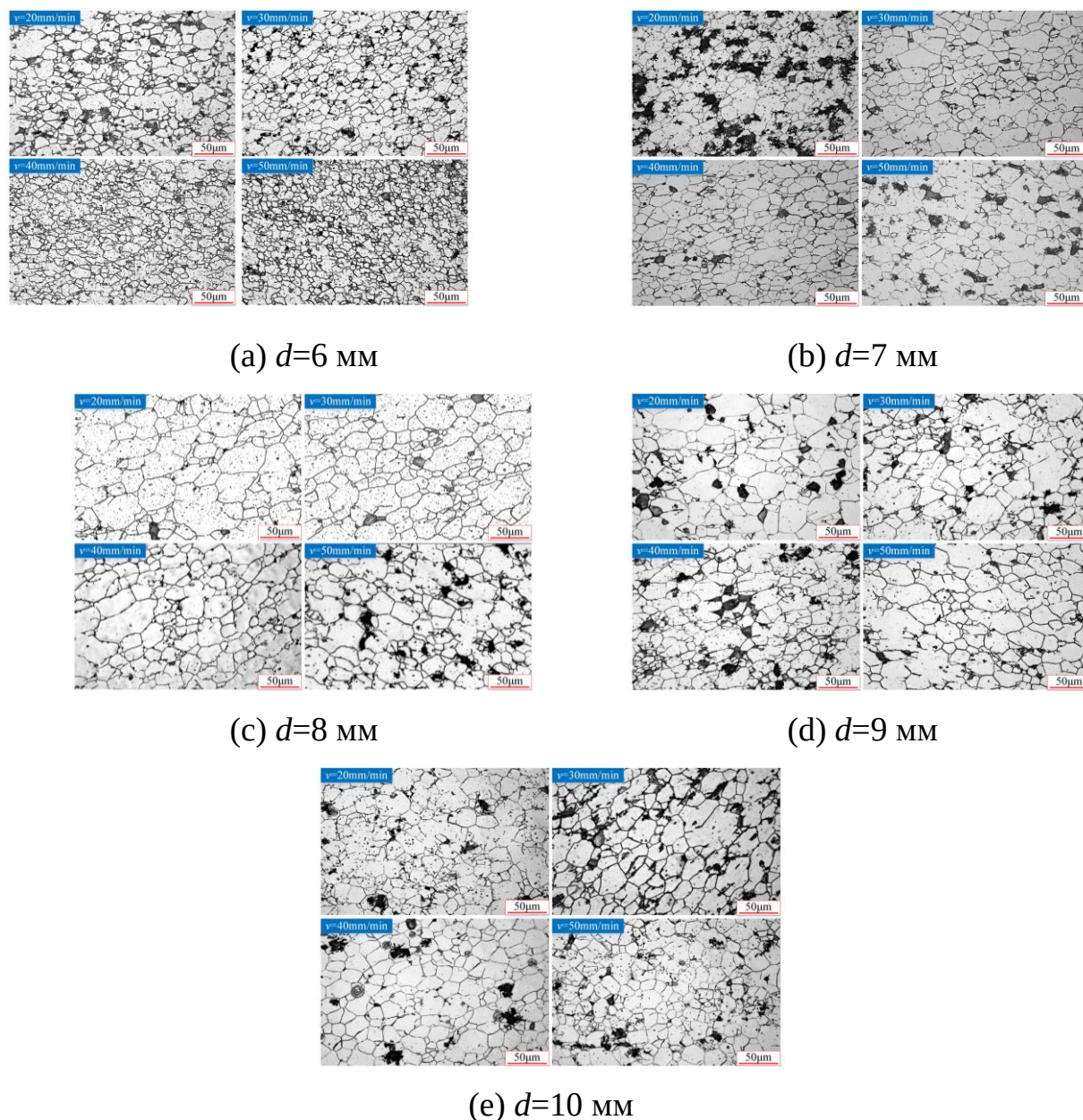


Рисунок 3.24 – Мікроструктура ЗВГ з різними діаметрами мішалок

Середній розмір зерен пластичного металу в зоні впливу перемішувального стрижня становить 39,3 мкм, 48,1 мкм, 43,3 мкм, 40,8 мкм і 33,53 мкм відповідно при різних діаметрах перемішувального інструменту, що показує, що середній розмір зерен спочатку збільшується, а потім зменшується зі збільшенням діаметра перемішувального інструменту. Однак вони були повністю подрібнені порівняно з базовим матеріалом. Це пов'язано з тим, що на цю зону безпосередньо впливає висока температура і стрижень для перемішування, а збільшення діаметра інструменту для перемішування призведе до підвищення температури, в результаті чого розбиті зерна частково

динамічно рекристалізуються з утворенням більших зерен. Тому, коли діаметр мішалки невеликий, зі збільшенням діаметра мішалки він може підвищити температуру, щоб викликати більш динамічне явище рекристалізації, що призводить до поступового збільшення середнього розміру зерна, коли діаметр мішалки продовжує збільшуватися, температурний вплив зони перемішувального стрижня в цей час досяг піку, збільшення діаметра перемішувального інструменту може призвести до підвищення температури, але не може прискорити швидкість динамічної рекристалізації, в цьому випадку більший діаметр перемішувального інструменту може призвести до більш інтенсивної екструзії та дроблення, як результат, середній розмір зерна поступово вдосконалюється.

Очевидно, що орієнтація зерен в зоні впливу мішалки під різними діаметрами мішалки відрізняється, особливо коли діаметр мішалки невеликий, це явище є найбільш очевидним, що в основному проявляється як більш рівномірне вздовж напрямку Z, але не має очевидної закономірності вздовж напрямків X і Y. Видно, що при великій механічній силі і низькій піковій температурі недостатньо для отримання великої кількості динамічної рекристалізації, що призводить до швидкого зростання зерен в цій області вздовж напрямку механічної сили, і, нарешті, показує рівномірний розподіл вздовж напрямку Z, як показано на рисунку 3.25. Зі збільшенням діаметра перемішуючого інструменту відношення діаметра до ширини зони перемішування в процесі розливання поступово зменшується, що призводить до більш легкого обтікання зони перемішування і меншої участі металу в потоці під час розливання, внаслідок чого пластичний метал в цій зоні наближається до стану основного металу, а потім призводить до того, що орієнтація його зерен поступово стає більш неупорядкованою зі збільшенням діаметра перемішуючого інструменту.

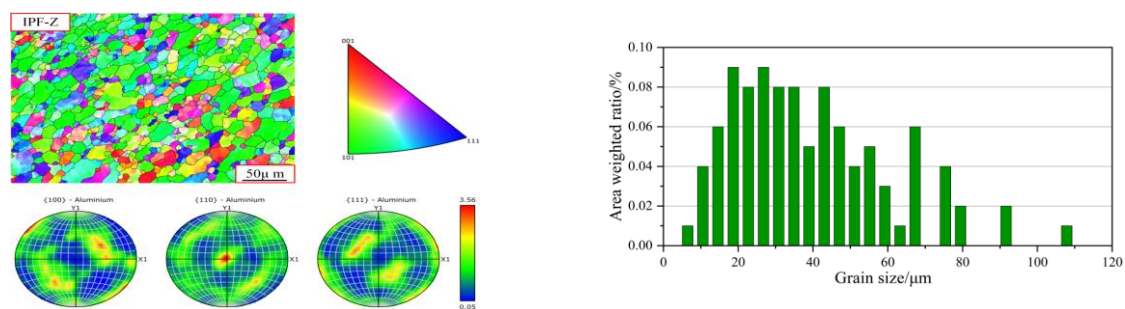
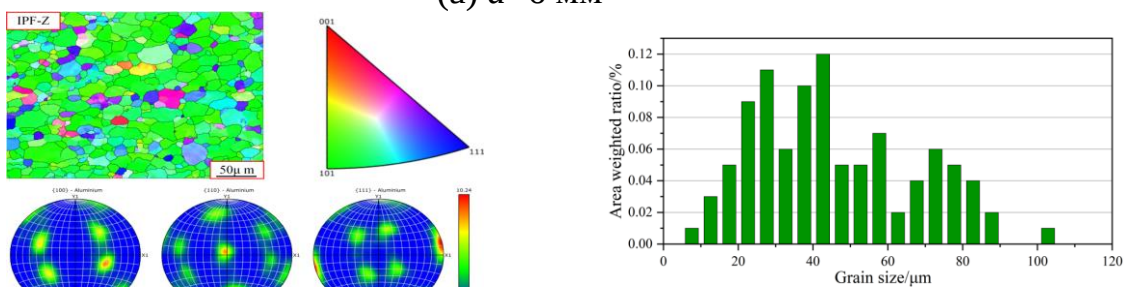
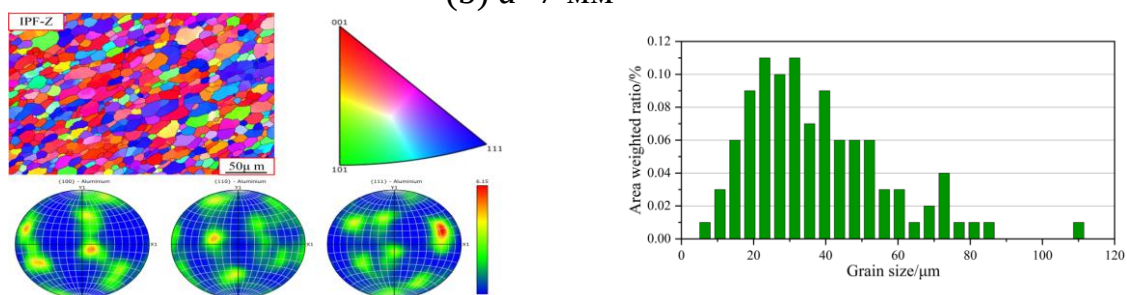
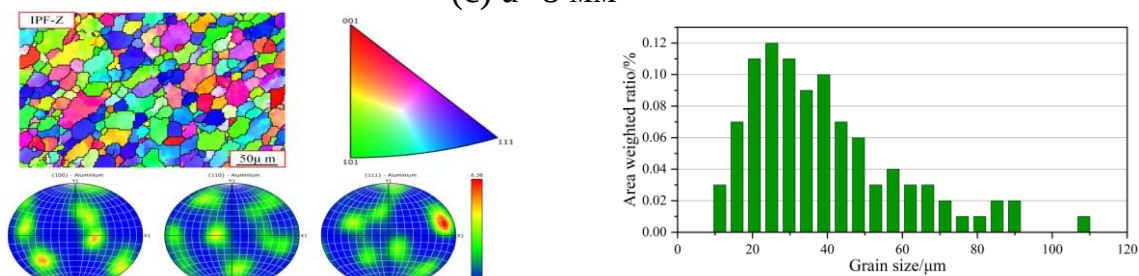
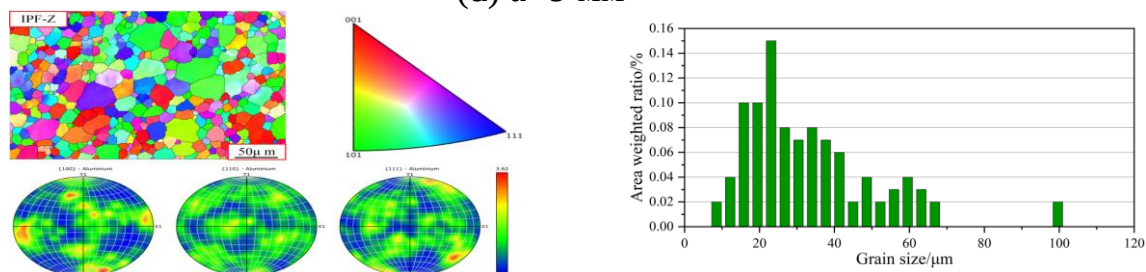
(a) $d=6$ mm(b) $d=7$ mm(c) $d=8$ mm(d) $d=9$ mm(e) $d=10$ mm

Рисунок 3.25 – Розподіл зернистості ЗВГ при різних діаметрах інструменту

Відмінність механізму рекристалізації в цих областях, ймовірно, пов'язана з різницею термічної історії та поля деформації. На противагу цьому, при вищій температурній експозиції і меншій деформації зсуву, ефект опору вихідного розчину в основному металі слабший, що призводить до більш рівномірної деформації і геометричної динамічної рекристалізації. Формування мікроструктури контролюється геометричною динамічною рекристалізацією периферії та безперервною динамічною рекристалізацією решти частин [90].

3.5 Висновки до розділу

У цьому розділі проаналізовано теоретичну модель тепловиділення в зоні ТЗТЗП та металографічну структуру при різних параметрах процесу, а також зроблено наступні висновки:

1. У зоні точкового зварювання швидкість занурення є основним фактором, що впливає на тепловклад, далі йде швидкість обертання та діаметр інструмента. Хоча діаметр інструмента має найбільший числовий вплив на максимальний тепловклад, його збільшення не завжди гарантує зростання тепловиділення, оскільки ефекти цих факторів просторово взаємопов'язані. Достеменно встановлено, що найменша швидкість занурення в поєднанні з найбільшою швидкістю обертання забезпечує максимальний тепловклад. Таким чином, діаметр інструмента визначає верхню межу тепловиділення, але сам по собі є недостатнім фактором.

2. За різних параметрів процесу та діаметрів інструмента поверхнева морфологія області ТЗТЗП суттєво відрізняється. Вона переважно визначається тепловкладом і тангенціальною швидкістю металу, які взаємно обмежують одне одного. Недостатній тепловклад призводить до поганої пластичності та появи дугоподібних чи точкових дефектів, тоді як надмірний тепловклад може спричинити локальне плавлення металу й налипання його на інструмент, що зумовлює поверхневі дефекти. Тому інструменти малого діаметра схильні формувати точкові дефекти, а великого – поверхневі.

3. Лінія розділу між верхньою та нижньою пластинами у зоні точкового зварювання повністю зникає, а на її зовнішніх ділянках спостерігаються різні напрямки вигину. Загалом, зі збільшенням діаметра інструмента для перемішування вигин поступово змінюється з висхідного на низхідний. Це пояснюється тим, що більший інструмент створює більший опір при зануренні, викликаючи низхідну деформацію металу в ширшій зоні навколо зони точкового зварювання, де відсутній достатній тепловклад для металу на стадії занурення. На стадії повторного заповнення тепловклад уже є достатнім, і метал біля інструмента переміщується вгору разом з ним, що, у свою чергу, зумовлює висхідний вигин лінії розділу верхньої та нижньої пластин.

4. На межі між ЗП і ЗТВ формується чітко виражена «зона з'єднання за принципом тертя-заклепки», яка є ключовою для формування ефективної зони перемішування та становить межу між основним металом і зоною перемішування у горизонтальному напрямі. Нижня частина зони впливу гільзи утворює трикутне «дископодібне кільце», яке виникає внаслідок зіткнення між основним металом та металом, витисненим і повторно заповненим стрижнем, що призводить до раптового зниження плинності обох і формування металургійного з'єднання у вигляді зварювання під тиском. Це становить межу між основним металом і зоною перемішування у вертикальному напрямі.

5. Розмір зерен у всій зоні перемішування зварного шва значно подрібнений порівняно з основним металом, однак спостерігаються суттєві відмінності у різних ділянках. Найбільші зерна – у зоні впливу перемішувального стрижня; у зоні впливу гільзи розподіл зерен нерівномірний: ближче до зони впливу стрижня вони більші, а з боку зони термомеханічного впливу (де розташована «зона тертя-заклепки») – найменші в усій зоні перемішування, оскільки тут відбувається найінтенсивніше тертя та дроблення. Металеві зерна по обидва боки «дискового кільця» внизу зони впливу гільзи значно дрібніші, ніж усередині. Розмір зерен у зоні термомеханічного впливу також менший, ніж у зоні впливу стрижня. Отже, зерна на межах усієї зони точкового зварювання є найбільш подрібненими, причому відносно вищий

ступінь подрібнення спостерігається у прикордонних ділянках у горизонтальному напрямі.

РОЗДІЛ 4 АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ЗОНИ ТОЧКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ

4.1 Вступ

ТЗТЗП пропонує високоякісні з'єднання для легких, термооброблюваних алюмінієвих сплавів, які широко використовуються в електромобілях для зменшення загальної ваги. Оскільки конструкційні з'єднання безпосередньо впливають на безпеку пасажирів, висока міцність зварювання, втомлюваність і ударна в'язкість мають важливе значення. Однак RFSSW викликає високі температури і сильне перемішування, що впливає на властивості матеріалу, такі як розмір зерна і залишкове напруження, а розмір зони зварювання також обмежує несучу здатність. Цей розділ присвячений тому, як діаметр інструменту і параметри процесу впливають на міцність на розтяг і зсув, мікротвердість, опір втомі і реакцію на високошвидкісну деформацію, з метою визначення ключових факторів продуктивності і підтримки практичного застосування.

4.2 Аналіз міцності на розтяг та зсув зони точкового зварювання

4.2.1 Аналіз форми руйнування зони точкового зварного шва на розтяг при зсуві

Випробування на розтяг при зсуві були проведені для ТЗТЗП з різними технологічними параметрами. Результати показують різні форми руйнування залежно від інструменту для перемішування. Відповідно до ISO 14273:2016, таке випробування дозволяє класифікувати типи руйнування точкових і виступних зварних з'єднань, як зображено на рисунку 4.1.

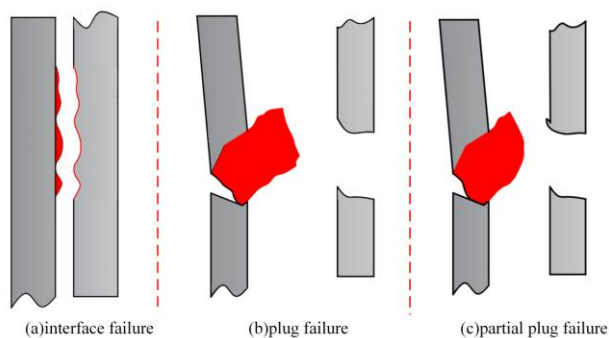


Рисунок 4.1 – Форма руйнування при розтягуванні зі зсувом в зоні ТЗТЗП

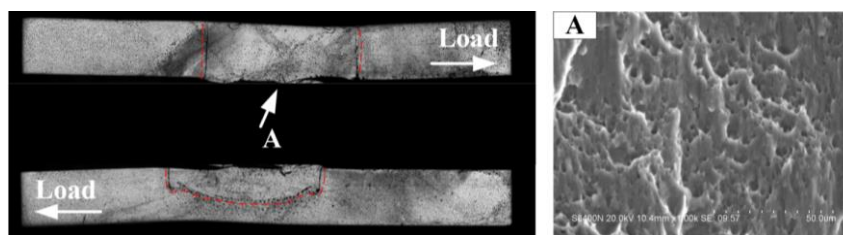
Коли руйнування відбувається за механізмом зсувного руйнування (рис. 4.2(a)): зона перемішування залишається неушкодженою та не відокремлюється від пластин. Руйнування проходить шляхом чистого зсуву між верхньою та нижньою пластинами. Зображення SEM показують в'язке руйнування з орієнтацією волокон у напрямку навантаження.

Коли руйнування відбувається за механізмом «пробкового» руйнування (рис. 4.2(b)): зона перемішування виривається разом із частиною основного металу. Спочатку відривається нижня частина, а потім повністю виривається верхня. SEM-аналіз показує крихке руйнування на верхній кромці та в'язке руйнування внизу, де стався розрив. Такий тип відмови зумовлений концентрацією напружень на межі між зоною перемішування та зоною термічного впливу.

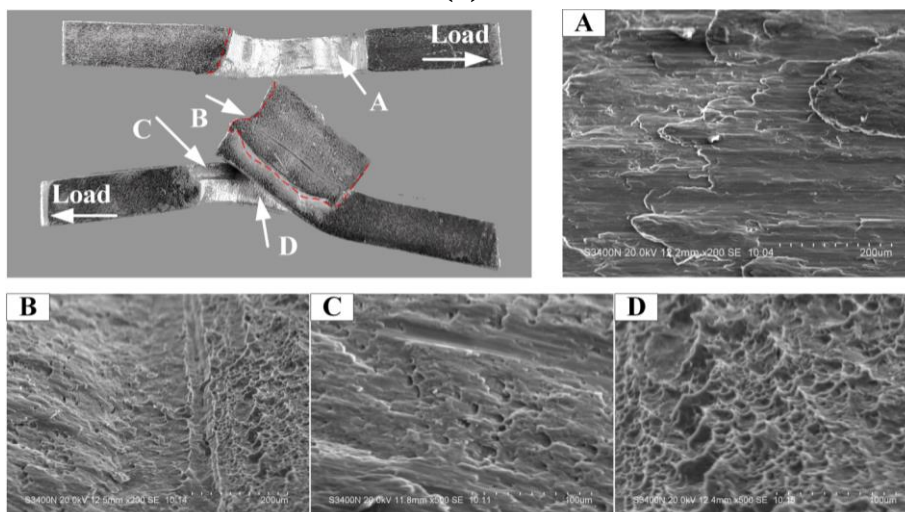
Коли руйнування відбувається за механізмом нижнього розриву з частковим зсувом (рис. 4.2(c)): воно подібне до руйнування за типом «боса», але супроводжується додатковим зсувним руйнуванням у верхній частині зони зварювання через прямий зсувний тиск на передню частину зони перемішування. Невелика площа навантаження підвищує ризик зсувної відмови.

Коли руйнування відбувається за механізмом часткового «пробкового» руйнування без нижнього розриву (рис. 4.2(d)): тріщин унизу не утворюється. Верхня частина зони перемішування згинається під дією навантаження, що викликає деформацію всієї зони зварювання та прилеглого металу. Зі

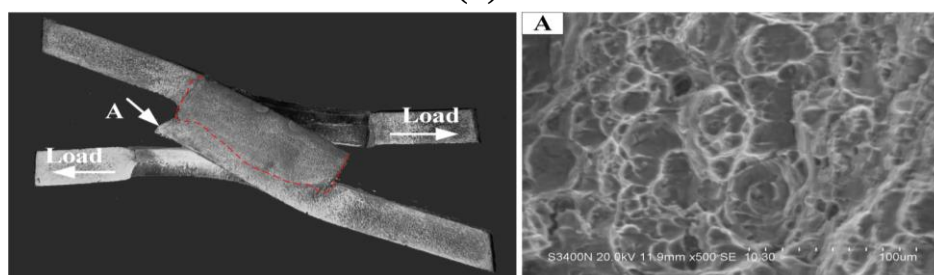
збільшенням згину навантаження переноситься на верхню частину, що призводить до часткового зсувного руйнування з в'язкими характеристиками.



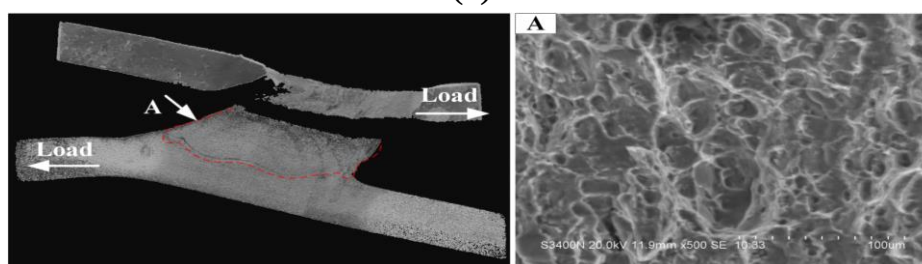
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) - Типова морфологія руйнування поверхні зчеплення; (b) - Типова морфологія несправностей штепсельних вилок; (c) - Типовий вигляд опуклого перелому - нижній розрив; (d) - Типовий вигляд часткового руйнування «пробки» - без розриву дна

Рисунок 4.2 – Типова морфологія руйнування при розтягуванні та зсуві в зоні

точкового зварювання

З цього видно, що, окрім форми руйнування по поверхні з'єднання, зовнішнє розтягувально-зсувне руйнування зосереджується переважно на межі між зоною перемішування та зоною термомеханічного впливу, тобто у «зоні з'єднання за принципом тертя-заклепки». При цьому руйнування за типом «боса» характеризується тріщиною в нижній пластині та повним вириванням верхньої частини; у випадку часткового руйнування за типом «боса» верхня частина зони перемішування повністю виривається з частковим зсувним зрізом [91–92].

Для подальшого дослідження причин різних форм руйнування необхідно проаналізувати вплив параметрів процесу. На рисунку 4.3 наведено порівняння форм руйнувань і відповідних зразків за різних діаметрів інструмента для перемішування.

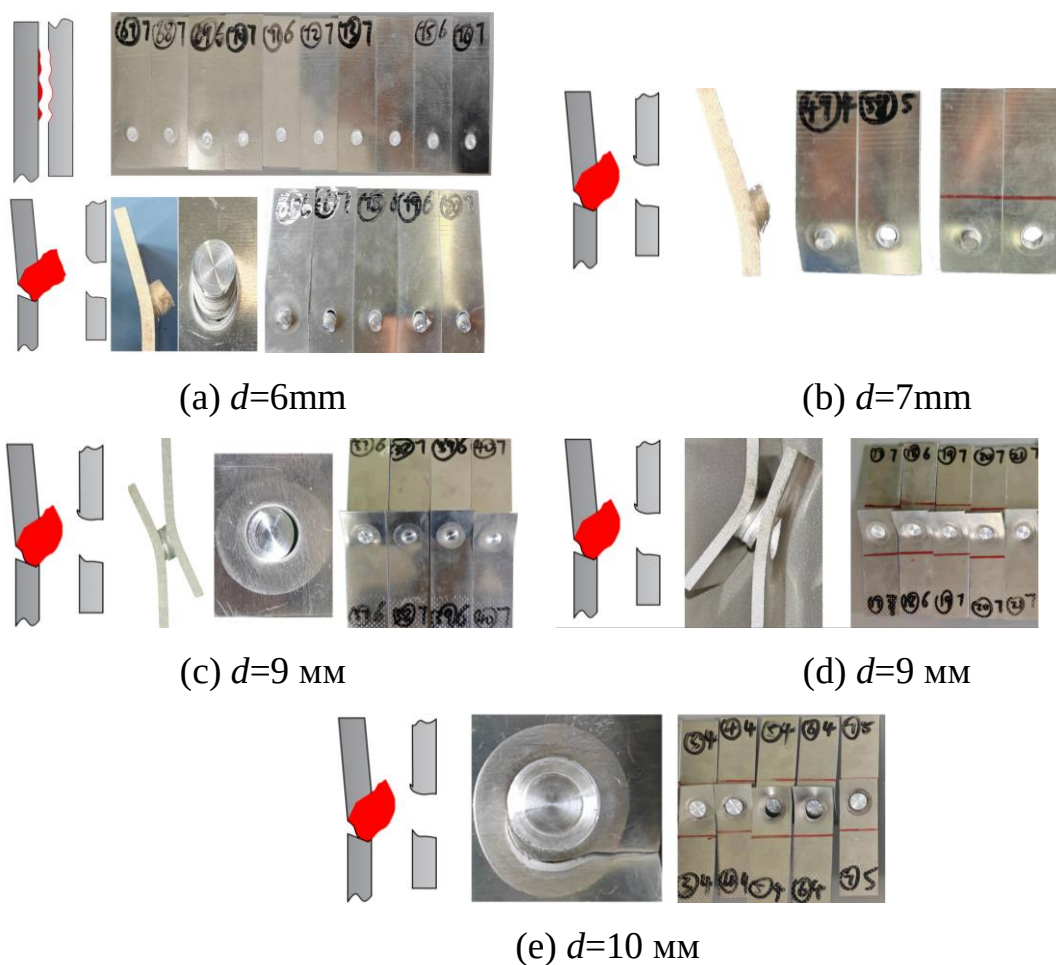
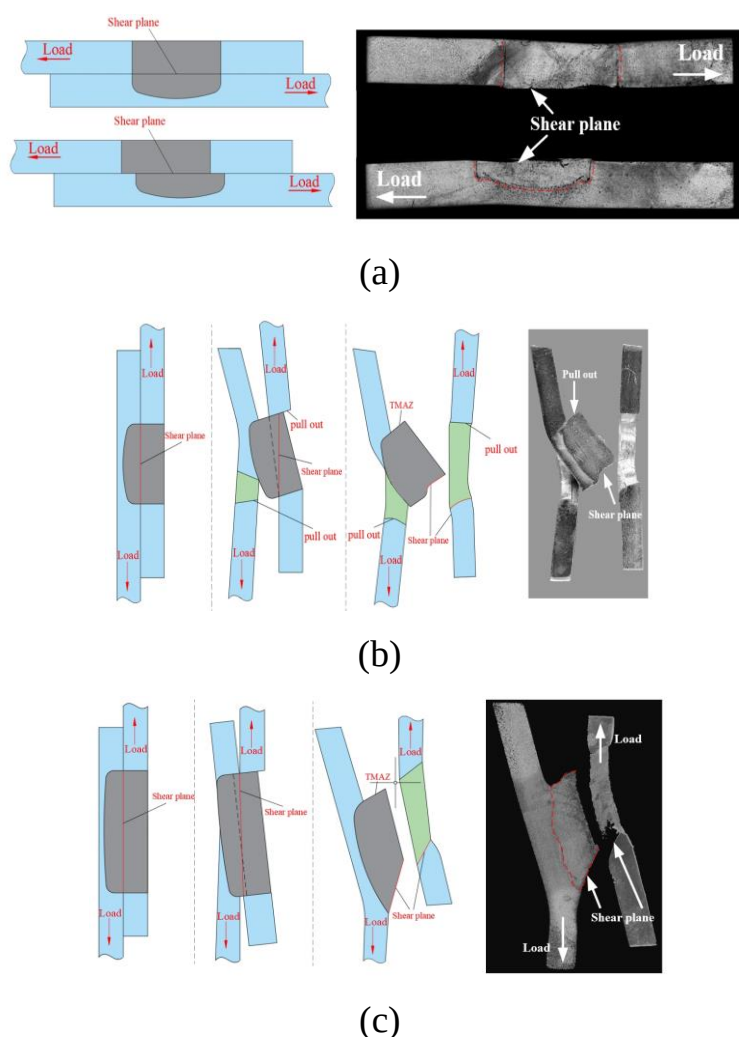


Рисунок 4.3 – Форма руйнування при розтягуванні та зсуві під різними

перемішуючими інструментами

Як видно з рисунка 4.3, при малому діаметрі інструмента для перемішування розтягуювально-зсувне руйнування в зоні точкового зварювання в основному проявляється як руйнування по межі з'єднання та руйнування за типом «пробки». Натомість при великому діаметрі інструмента воно переважно проявляється як часткове руйнування за типом «пробки». Однак при діаметрі інструмента 6 мм руйнування по межі з'єднання спостерігається лише за швидкості обертання 1600 об/хв [93].



(a)- Процес формування міжфазної тріщини; (b) - Процес формування тріщини «пробки»; (c) - Процес утворення часткового «пробкового» руйнування

Рисунок 4.4 – Процес утворення тріщини розтягнення-зсуву в зоні точкового зварювання

Щоб уточнити вплив діаметра інструмента для перемішування на характер руйнування, на рисунку 4.4 показано еволюцію розтягувально-зсувних руйнувань.

При малому діаметрі інструмента зона перемішування є невеликою, а тепловклад низьким, тому основний метал зберігає високу твердість. Руйнування відбувається чітко по межі з'єднання, часто поблизу дефекту «Hook».

Зі збільшенням діаметра інструмента зона перемішування розширюється, тепловклад зростає, і навколишній основний метал розм'якшується. Зона перемішування з дрібними зернами та вищою міцністю залишається неушкодженою, тоді як розм'якшений основний метал деформується. Це призводить до нахилу зони перемішування та зміщення шляху руйнування, що проявляється у вигляді руйнування за типом «боса», як на рис. 4.4(b).

При ще більшому діаметрі інструмента розм'якшення посилюється, зона перемішування нахиляється ще сильніше, площа зсуву істотно зміщується, що призводить до часткового розриву у верхній частині зони перемішування та більш вираженого руйнування за типом «боса», як показано на рис. 4.4 (с).

Аналіз показує, що кінцеві зсувні руйнування зазвичай ініціюються поблизу дефекту «Hook», при цьому зона перемішування завжди виривається з верхньої пластини. Це тісно пов'язано з кутом вигину «Hook» (Ψ) та формою межі між пластинами. Коли точкове зварювання має вертикальне проникнення, а верхня і нижня пластини паралельні, розтягувально-зсувне навантаження діє безпосередньо на радіальний переріз зони перемішування, що сприяє руйнуванню по межі з'єднання, як показано на рис. 4.3(a).

За вищих швидкостей обертання підвищений тепловклад розм'якшує нижню пластину. Верхня пластина стає увігнутою, а нижня – опуклою, що змінює кут зсувної площини. Це спричиняє нахил зони перемішування, і, оскільки розм'якшена нижня пластина послаблюється, тоді як зміцнена зона

перемішування зберігає міцність, відрив відбувається під зварною зоною – формується руйнування за типом «пробки».

Із подальшим зростанням діаметра інструмента розтягувально-зсувне руйнування проявляється переважно як часткове руйнування за типом «боса». Це пов'язано з тим, що при великому діаметрі інструмента більша частина зони точкового зварювання формується у вигляді вертикального проникнення з опуклою верхньою пластиною та увігнутою нижньою пластиною. Метал під зоною зварювання зазнає сильнішого відпалу й розм'якшення внаслідок зростання тепловкладу, що підсилює нахил зони перемішування й виривання з нижньої пластини. У процесі розтягувально-зсувного навантаження з нахилом зони перемішування навантаження поступово переноситься на передню частину зони перемішування, де формується зсувне руйнування між точкозвареною пластиною та переднім краєм зони перемішування.

Зокрема, коли діаметр голки становить 10 мм, відбувається однобічне руйнування основного металу верхньої пластини, що також підтверджує, що під час розтягувально-зсувного навантаження зона перемішування спочатку зазнає нахилу. Через значний об'єм зони перемішування при такому діаметрі інструмента її складно ефективно нахилити, і це зрештою призводить до однобічного руйнування основного металу верхньої пластини, як показано на рис. 4.3(е).

Підсумок: збільшення діаметра інструмента спричиняє зростання зони перемішування та тепловкладу, що розм'якшує навколишній матеріал і змінює шлях руйнування – від зсуву по межі до виривання зони перемішування.

4.2.2 Сила зсувного розтягування (СЗР) при використанні різних інструментів для перемішування

На рис. 4.5 показана крива зсуву-розтягування зони точкового зварювання при різних параметрах процесу, коли діаметр стрижня становить 6 мм, видно, що при низькій і високій швидкості обертання крива зсуву має більш очевидну горизонтальну ступінчасту фазу, а при меншій швидкості крива зсуву-

деформації в основному горизонтальна, і сила зсуву значно зменшується, а навантаження залишається в основному незмінною при безперервній появі деформації. Під час цієї фази навантаження на зсув поступово зменшується. Коли швидкість обертання висока, сила зсуву на цьому етапі явно не зменшується, а сила зсуву продовжує зростати з виникненням деформації і перевищує попереднє значення.

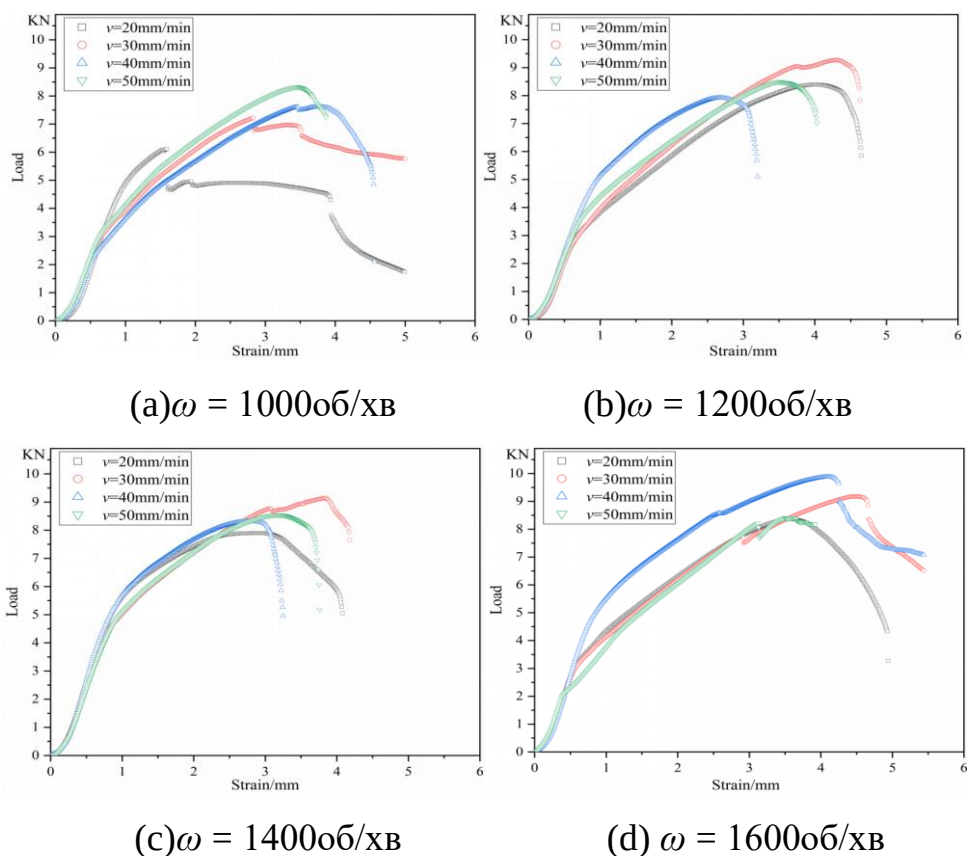


Рисунок 4.5 – Діаметр перемішуючого стрижня $d=6\text{ мм}$

На рисунку 4.6 наведено криві напруження–деформації при розтягувально-зсувному навантаженні для випадку, коли діаметр голки становить 7 мм. За різних параметрів процесу форма кривих загалом змінюється незначно. Спочатку спостерігається стадія пружної деформації при малих значеннях деформації, далі – різкий спад напруження зі зростанням деформації, а потім поступове зниження напруження до моменту руйнування.

Аналіз поверхні руйнування показує, що така поведінка зумовлена переважно частковим руйнуванням за типом «боса».

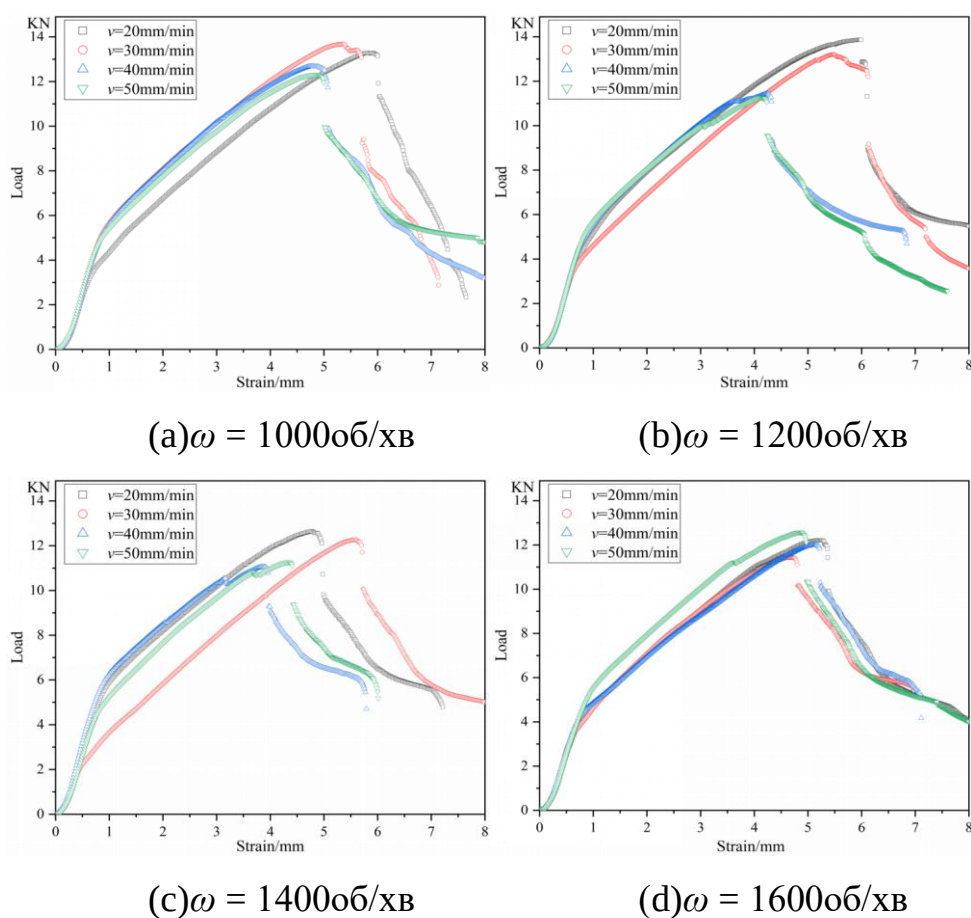


Рисунок 4.6 – Діаметр перемішуючого стрижня $d=7 \text{ мм}$

На початковій стадії деформація спричиняє поступове виривання та нахил зони перемішування, що приводить до розриву між нижньою кромкою зони перемішування та основним металом і ініціює тріщину з подальшим зниженням напруження. У міру подальшого нахилу зони перемішування змінюється розподіл напружень між верхньою пластиною та зоною перемішування: верхня частина починає відокремлюватися, тоді як у нижній частині зростає стискальне напруження, що зумовлює ще один різкий спад на кривій. При подальшому зростанні деформації зона перемішування ще більше витягується під більшим кутом нахилу, що потребує меншого навантаження. Це проявляється у вигляді плавного зниження напруження зі збільшенням

деформації, аж доки верхня пластина стискально не зрізує передню частину зони перемішування, завершуючи процес руйнування.

Як показано на рисунках 4.7 – 4.9, при великому діаметрі інструмента для перемішування криві «напруження–деформація» подібні до тих, що спостерігаються при $d = 7$ мм, що свідчить про однаковий характер процесу руйнування, тому детальний опис тут не повторюється. Для руйнувань за типом «боса» пікове розтягувально-зсувне напруження зазвичай виникає в момент відокремлення верхньої сторони зони перемішування від верхньої пластини, що підкреслює важливість міцності межі між ЗТВ та зоною ЗП для визначення загальної міцності з'єднання.

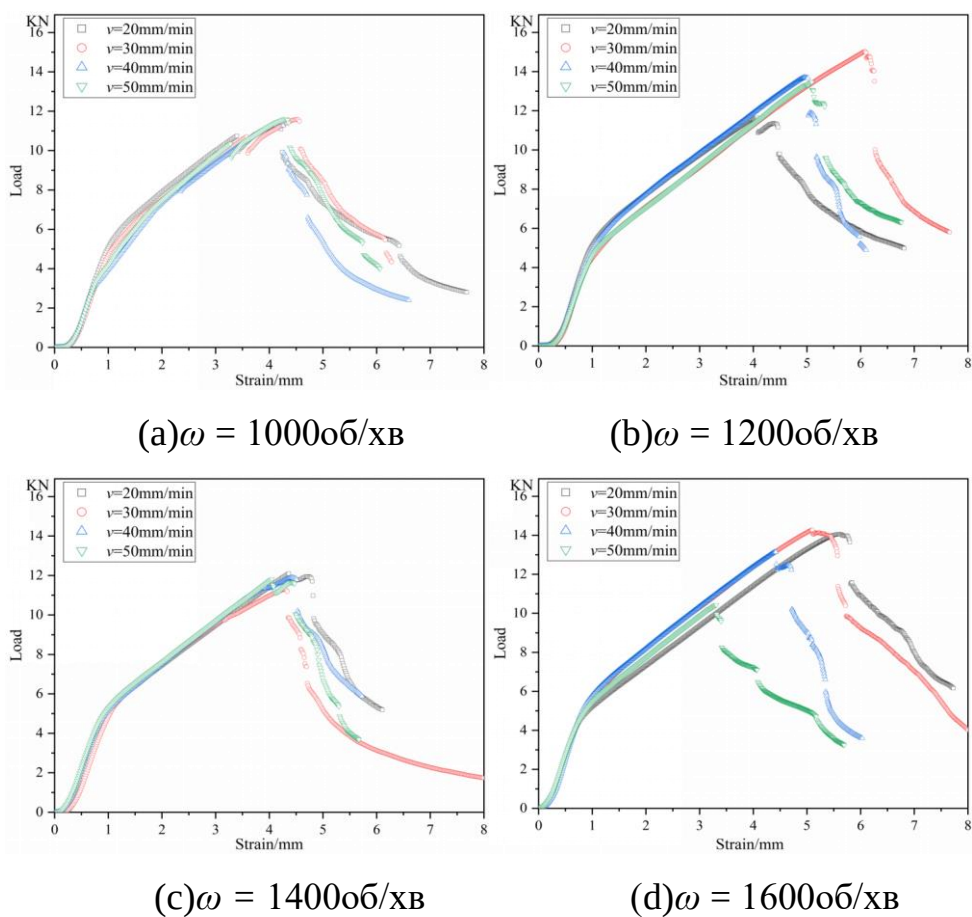


Рисунок 4.7 – Діаметр мішалки $d=8$ мм

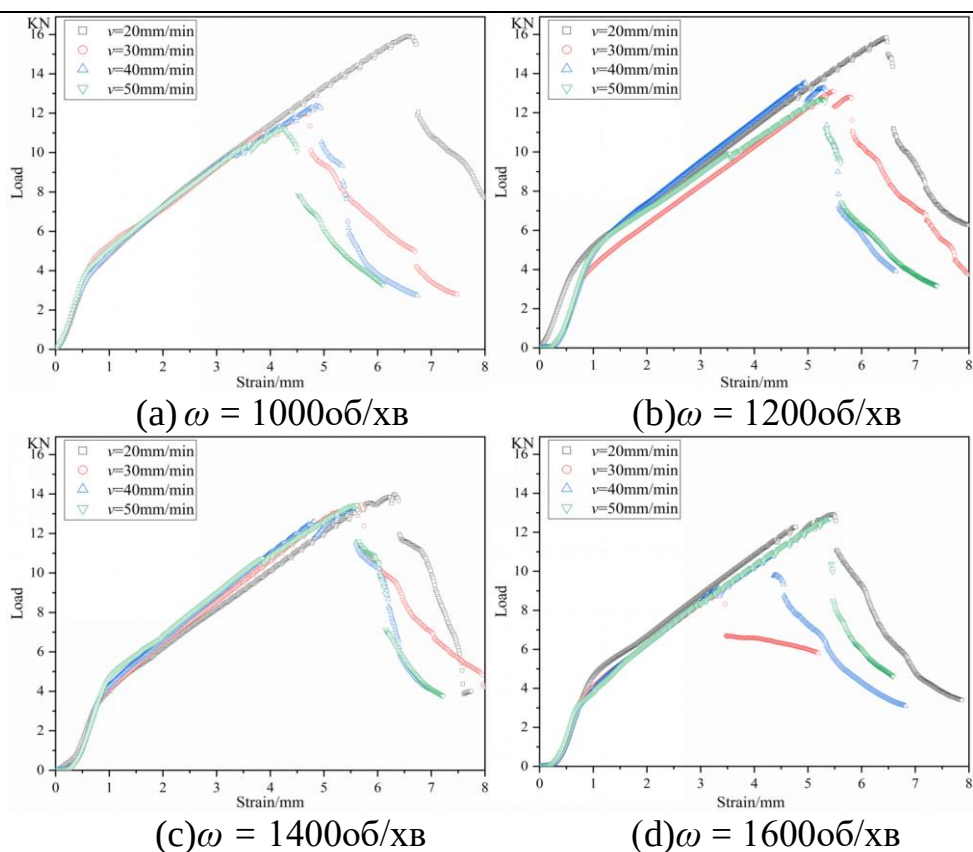
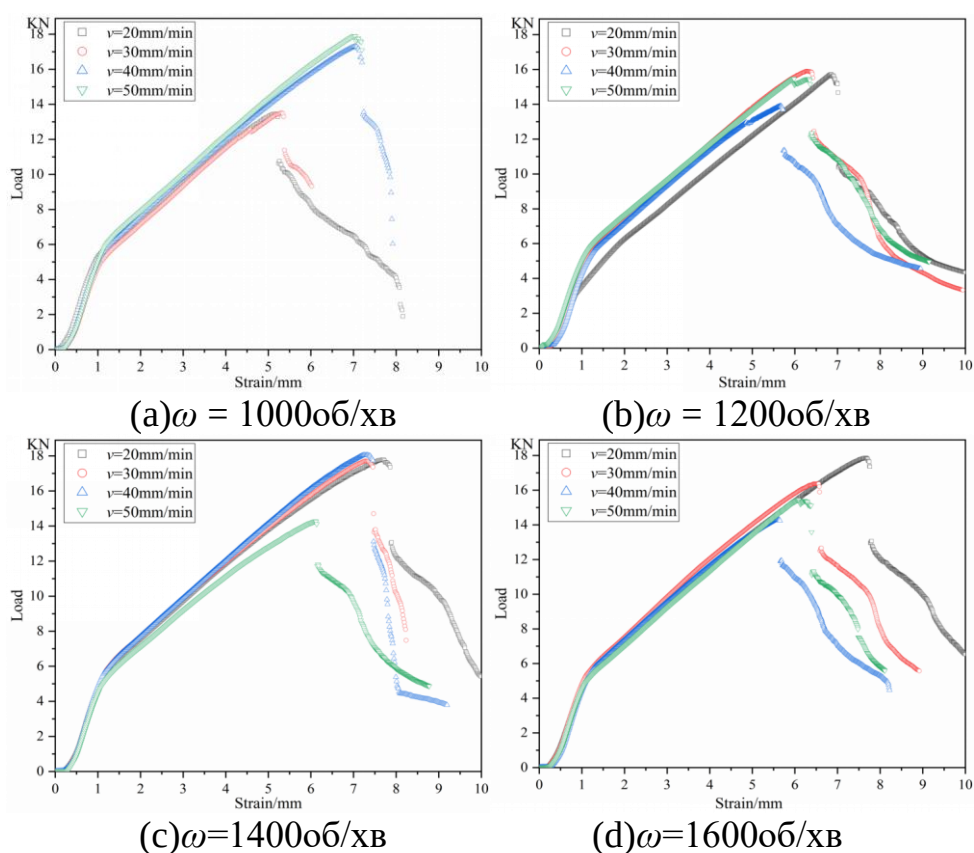
Рисунок 4.8 – Діаметр мішалки $d=9\text{ мм}$ Рисунок 4.9 – Діаметр перемішуючого штиря $d=10\text{ мм}$

Рисунок 4.10 показує, що рівень зсувного розтягування (СЗР) зростає зі збільшенням діаметру перемішуючого інструменту, що вказує на позитивну кореляцію. Це пояснюється тим, що поперечний переріз зони зварювання стає більшим і відіграє більш домінуючу роль в опорі розтягувально-зсувним навантаженням.

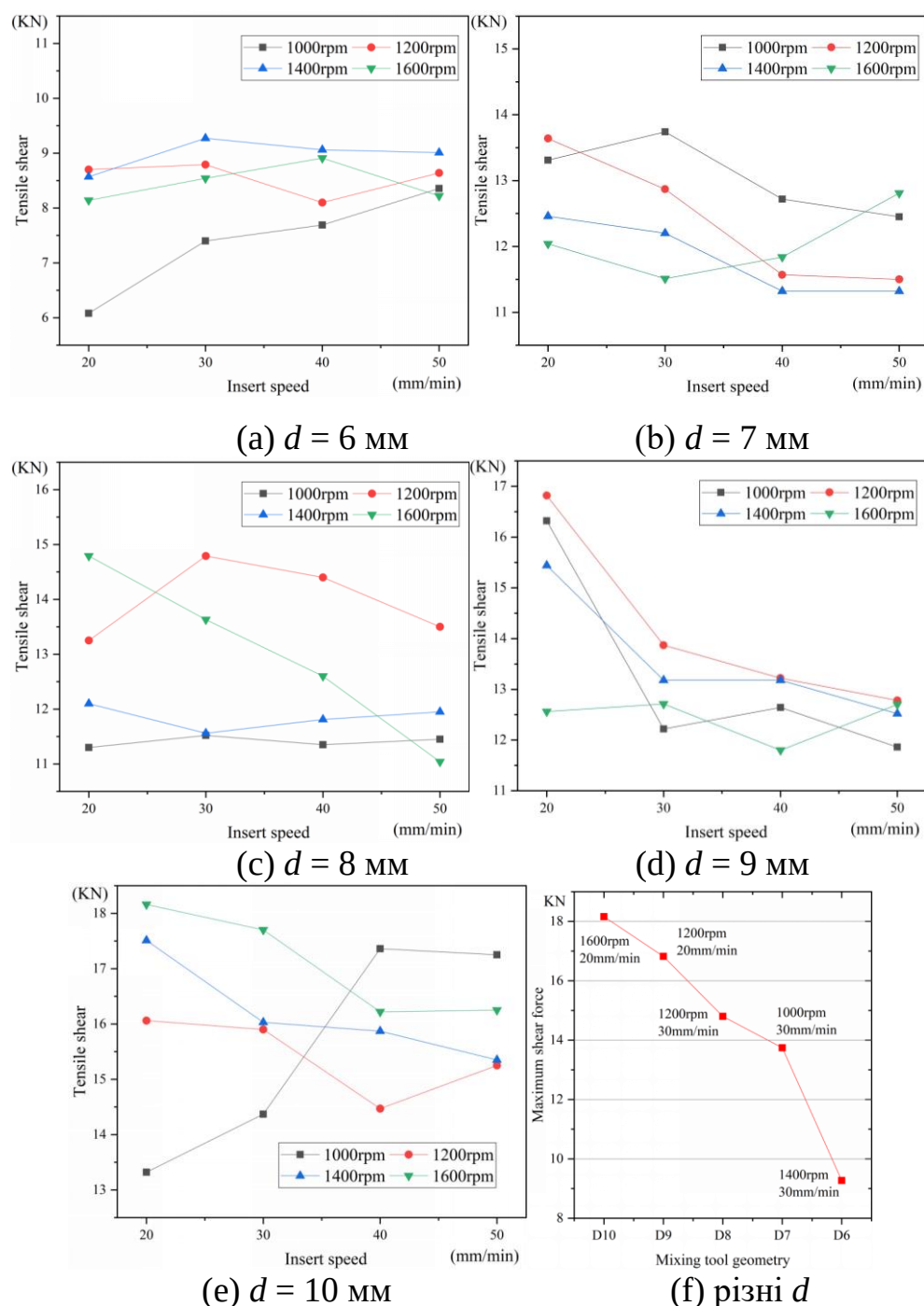


Рисунок 4.10 – Максимальне зусилля розтягування та зсуву при використанні різних інструментів

У той же час, відповідно до значення максимального тепловкладення,

наведеного на рис. 3.6 вищевказаного розділу, можна виявити, що існує очевидний взаємозв'язок між максимальним зусиллям розтягування-зсуву і максимальним тепловкладенням, який проявляється в тому, що тепловкладення $Q_{\text{Total-in}}$, що відповідає параметру процесу з СЗР, визначається як Q_{good} при малому діаметрі перемішуючого інструменту, а навантаження руйнування при випробуванні на розтяг-зсув, що відповідає параметрам процесу $Q_{\text{Total-in}}$ при інших параметрах процесу, також добре, коли воно близьке до тепловкладення Q_{good} . Цей момент дуже очевидний, коли діаметр стрижня становить 6 мм і 7 мм, наприклад, максимальна сила розтягування і зсуву, коли перемішуючий інструмент становить 6 мм, і СЗР з'являється при параметрах процесу $\omega=1400$ об/хв і $v=30$ мм/хв, поточний тепловий потік $Q_{\text{Total-in}}$ дорівнює 5451 в безблочному випадку, а тепловий потік $Q_{\text{Total-in}}$ при параметрах процесу максимальної сили розтягування і зсуву при $\omega=1000$ об/хв, 1200 об/хв і 1600 об/хв дорівнює 6028, відповідно. 4765 і 4605, амплітуда коливань не перевищує 16%, а максимальна і мінімальна тепловіддача $Q_{\text{Total-in}}$ при поточному діаметрі інструменту становлять 10690 і 2150 відповідно, а максимальна амплітуда коливань перевищує 96% і 139%. Видно, що існує відповідна максимальна тепловіддача при поточному діаметрі перемішуючого інструменту, що, очевидно, може вплинути на СЗР в зоні точкового зварювання.

Це явище не є поодиноким випадком, коли діаметр перемішуючого інструменту становить 7 мм, є також таке явище, СЗР з'являється при параметрах процесу $\omega = 1000$ об/хв, $v = 30$ мм/хв, тепловий потік Q_{good} в цей час становить 3768 в безрозмірному випадку, а тепловий потік $Q_{\text{Total-in}}$ при параметрах процесу максимального розтягуючого зусилля зсуву при $\omega = 1400$ об/хв і 1600 об/хв становить 3187 і 3685 відповідно, і амплітуда його коливань не перевищує 16%. В даний час максимальний і мінімальний тепловий потік $Q_{\text{Total-in}}$ під діаметром мішалки становлять 11070 і 2187 відповідно, а максимальна амплітуда коливань перевищує 72% і 193%, тобто є також відповідний діапазон теплового потоку. Однак тут спостерігається особлива ситуація, тепловкладення $Q_{\text{Total-in}}$ за параметром процесу

максимальної сили розтягування-зсуву при $\omega = 1200$ об/хв становить 7824, що досить сильно відрізняється від значення Q_{good} , а значення сили розтягування-зсуву за параметром процесу з тепловкладенням $Q_{\text{Total-in}}$ близьке до значення Q_{good} , хоча і не є оптимальним, але поступається лише оптимальному значенню сили розтягування-зсуву.

Зі збільшенням діаметра перемішуючого інструменту вищевказана закономірність вже не є очевидною, але все ще можна отримати іншу закономірність, тобто максимальне зусилля розтягування-зсуву при різних швидкостях обертання завжди з'являється при параметрі процесу з великою кількістю підведеного тепла, що найбільш очевидно при більшому діаметрі перемішуючого інструменту, очевидно, що зі збільшенням діаметра перемішуючого інструменту збільшується і об'єм зони точкового зварювання, і для повної розм'якшення металу, щоб сприяти його формоутворенню, потрібна більша кількість теплоти.

При діаметрі перемішуючого інструменту 6 мм вплив параметрів процесу на максимальне зусилля розтягування-зсуву мінімальний, і ця тенденція стає більш вираженою при більш високих швидкостях обертання. При 1000 об/хв збільшення швидкості занурення дещо покращує силу зсуву, але загальний рівень залишається низьким.

Це пояснюється тим, що хоча вищі швидкості обертання можуть збільшувати загальний тепловклад, зона високих температур обмежується малим діаметром інструмента. Через високу теплопровідність алюмінію значна частина тепла розсіюється в навколишній основний метал, що не дозволяє зоні точкового зварювання досягти достатніх температур для пластифікації. Це може призводити до неповного повторного заповнення матеріалу або виникнення дефектів, таких як кільцеподібні порожнини на дні зварного з'єднання, що, у свою чергу, спричиняє руйнування по межі з'єднання.

За нижчих швидкостей обертання тепловклад помірний, але достатній для формування зварного з'єднання. Зменшений тепловий вплив також

обмежує надмірний відпал, що позитивно позначається на міцності з'єднання. У результаті зусилля зсуву зростає зі збільшенням швидкості занурення.

Із підвищенням швидкості обертання додатковий тепловклад сприяє розм'якшенню матеріалу та зварюванню за рахунок тиску й дифузії, що розширює площу, здатну сприймати навантаження. Проте, оскільки прикладений тиск залишається сталим, це підсилення є обмеженим. Зрештою, механізм руйнування змінюється на руйнування за типом «боса», а зусилля зсуву стабілізується, демонструючи незначні коливання незалежно від подальшого зростання швидкості обертання чи занурення.

При збільшенні діаметра мішалки до 7 мм сила розтягу-зсуву при 1600 об/хв показує тенденцію до зростання зі збільшенням швидкості занурення. Така поведінка подібна до тієї, що спостерігається при використанні інструменту 6 мм, і підтверджується порівнянними значеннями теплового впливу. При найвищій швидкості занурення мінімальне теплове навантаження становить 3685, що близько до значення, яке відповідає оптимальній силі зсуву. При інших швидкостях обертання сила зсуву, як правило, зменшується. Крім того, форма течії металу «перевернутий гриб» впливає на компактність заправки. Нижчі швидкості обертання і вищі швидкості занурення можуть призвести до поганого зчеплення між краями потоку і основним металом, що знижує міцність на зсув. Це також пояснює постійне руйнування за типом «боса», що спостерігається при цьому діаметрі.

При подальшому збільшенні діаметра перемішуючого інструменту вплив «перевернутої грибоподібної» форми течії металу на щільність заповнення зони точкового зварювання ще більше посилюється. При діаметрі перемішуючого інструменту 8 мм і 9 мм видно, що зі збільшенням швидкості проплавлення максимальна сила зсуву в цілому демонструє тенденцію до зниження, і це явище є найбільшим і найбільшою амплітудою при діаметрі перемішуючого інструменту 9 мм. З точки зору швидкості обертання, для інструментів різного діаметру закон впливу не є очевидним, але максимальна сила зсуву досягається при швидкості 1200 об/хв, а точніше, максимальна сила

зсуву обох інструментів виникає при параметрах процесу швидкості обертання 1200 об/хв і швидкості проникнення 30 мм/хв. Аналіз вважає, що збільшення діаметра перемішуючого інструменту спричиняє подальше збільшення коефіцієнта k , а зона точкового зварювання має достатній тепловий потік для повного підтримання металу, що бере участь у точковому зварюванні, до досягнення температури розм'якшення металу, а збільшення швидкості проникнення спричиняє зниження максимальної сили зсуву на розтягнення, більшою мірою тому, що «перевернутий грибоподібний» потік металу не може встигнути досягти самого краю зони точкового зварювання, а комплексна продуктивність «зони склеювання заклепки фрикційної пробки» не є високою, в результаті чого перелом при розтягуванні на зсув є повним переломом за типом «боса», тобто край зони точкового зварювання відшаровується від основного металу. У той же час, оскільки коефіцієнт k в цей час більший, достатнє надходження тепла також спричиняє явище відпалу в зоні точкового зварювання та її околицях, що призводить до зниження механічних властивостей, а менша швидкість проникнення призведе до збільшення часу точкового зварювання та більшого надходження тепла, тобто, явище відпалу є більш очевидним, що також є причиною того, що швидкість проплавлення становить 20 мм / хв, хоча це може сприяти «перевернутому грибоподібному» потоку металу, щоб досягти самого краю зони точкового зварювання та забезпечити тісну інтеграцію з основним металом, але все ще не вдається отримати кращу силу зсуву при розтягуванні.

Зі збільшенням діаметра перемішуючого інструменту, тобто коли діаметр перемішуючого інструменту становить до 10 мм, тенденція сили розтягування-зсуву в основному схожа на наведений вище аналіз, а максимальна сила розтягування та зсуву поступово збільшується зі збільшенням швидкості проплавлення, коли мінімальна швидкість обертання становить 1000 об/хв, що доводить, що при більшому діаметрі перемішуючого інструменту зона точкового зварювання має достатнє тепловідведення, а тепловідведення є відносно низьким при меншій швидкості обертання. Це

зменшує вплив відпалу на продуктивність всієї зони точкового зварювання та прилеглої до неї зони. «Перевернутий грибоподібний» потік металу займає більше часу, щоб досягти краю по діаметру мішалки, тому оптимальне зусилля розтягування і зсуву при параметрах процесу 1600 об/хв і 20 мм/хв може забезпечити досягнення відносно хорошої міцності з'єднання «фрикційна пробка-заклепка». Аналогічно, за цих параметрів процесу в зоні точкового зварювання та навколо неї спостерігається значне відпалювання, що призводить до появи тріщини розтягу зсуву з боку основного металу.

Загалом, зі збільшенням діаметра перемішуючого інструменту зростає і максимальне зусилля зсуву. Перемішуючі інструменти різного діаметру можуть досягти максимального зусилля зсуву при швидкості введення як 20 мм/хв, так і 30 мм/хв, що свідчить про те, що нижча швидкість введення сприяє збільшенню максимального зусилля зсуву. Нижчі швидкості введення забезпечують більш ретельне перемішування, дозволяючи «грибоподібному» потоку металу мати достатньо часу, щоб досягти краю зони точкового зварювання, де він щільно з'єднується з основним матеріалом, утворюючи відмінну «зону з'єднання фрикційної заклепки», що сприяє міцному з'єднанню металів верхньої і нижньої пластини. Однак цей параметр процесу також призводить до більш високих теплових витрат, що призводить до помітного відпалу в зоні точкового зварювання. Різні діаметри перемішуючого інструменту демонструють відпал при різних параметрах процесу. Коли діаметр перемішуючого інструменту менший (6 мм і 7 мм), ерез меншу площу точкового зварного шва загальне тепло може швидко розсіюватися в основний матеріал, і цей ефект можна зменшити, знизивши швидкість обертання, саме тому збільшення швидкості врізання при певних параметрах процесу призводить до збільшення максимального зусилля зсуву. Навпаки, коли діаметр перемішувального інструмента є більшим, незалежно від параметрів процесу тепловкладення залишається високим, і зміна параметрів не дозволяє уникнути рекристалізаційного відпалу. Тому щільне з'єднання зони «тертевого заклепкового з'єднання» з основним матеріалом підвищує міцність на розтяг

при зсуві.

У цьому дослідженні розглядаються зразки зі швидкістю обертання 1600 об/хв і швидкістю введення 30 мм/хв з використанням змішувача діаметром 10 мм, як показано на рисунку 4.11.

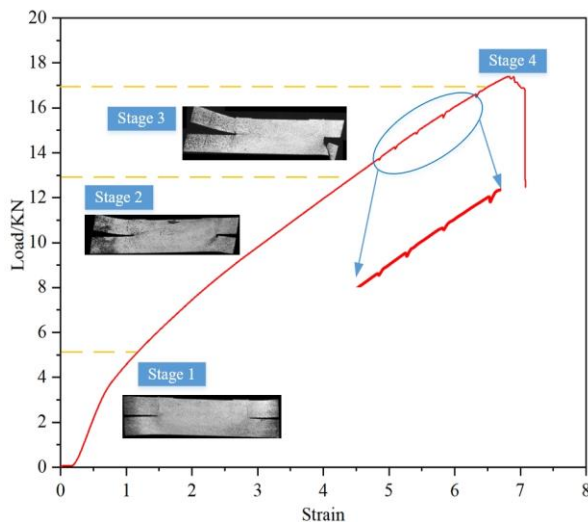


Рисунок 4.11 – Крива «напруження-зсув-переміщення»

Процес зсуву поділяється на чотири стадії: початкова еластична стадія, стабільна еластична стадія, стадія зміцнення межі текучості та стадія руйнування. Як на початковій, так і на стабільній пружній стадіях відбувається пружна деформація; однак на початковій стадії крива напруження-переміщення не є гладкою через незначне дифузійне зварювання під тиском поза зоною точкового зварювання, спричинене високою температурою і тиском, поступово руйнуючись і утворюючи невеликі зазори, коли напруження є низьким. Зі збільшенням напруги він переходить у стабільну пружну стадію, де нагромаджувач точкового зварного шва несе всі навантаження і зазнає значної пластичної деформації, що призводить до плавної прямої лінії на кривій зсуву, а в зоні точкового зварного шва спостерігаються нахилені нагромаджувачі. При подальшому збільшенні напруги він переходить у стадію зміцнення текучості, що характеризується чіткими гострими піками на кривій зсуву-переміщення.

4.2.3 Взаємозв'язок між навантаження руйнування при випробуванні на розтяг-зсув і перемішуючим інструментом

З наведеного вище аналізу видно, що максимальна сила зсуву в зоні точкового зварювання має чітку позитивну кореляцію з діаметром перемішувального інструмента та суттєво залежить від параметрів процесу. Оскільки всі навантаження на початку зсувного розтягування діють на поперечний переріз зони точкового зварювання, це безпосередньо пов'язано з ефективним діаметром і несучою здатністю цього перерізу. У попередньому розділі вже було чітко зазначено, що ефективний діаметр зони точкового зварювання по суті відповідає діаметру перемішувального інструмента. Однак початкова точка та траєкторія розвитку остаточної тріщини тісно пов'язані з дефектом типу «гачок» (*Hook*) і зоною «тертєвого заклепкового з'єднання» (*friction plug riveting bonding zone*). Причини формування та морфологія цих двох елементів залежать від діаметра стрижня інструмента d , діаметра гільзи D та площі поперечного перерізу S зони точкового зварювання.

Для більш детального вивчення впливу перемішувальних інструментів на максимальну силу зсуву було застосовано математичне апроксимування, яке описує взаємозв'язок між відповідними чинниками. У таблиці 4.1 наведено значення максимальної сили зсувного розтягування (ЗСР) та відповідних факторів для різних діаметрів перемішувальних інструментів. Для апроксимації залежності за даними, наведеними в таблиці 4.1, було використано метод множинної лінійної регресії. Підсумкові результати моделювання наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 – Значення ЗСР при різних діаметрах перемішувального інструмента та відповідні фактори

Тип	Стрижень, мм	Гільза, мм	Зона зварювання, мм ²	Міцність на зсув, кН
d6	6	9	20.25π	9.27
d7	7	10	25π	13.74
d8	8	12	36π	14.79
d9	9	13.5	43.87π	16.82
d10	10	15	56.25π	18.16

Таблиця 4.2 – Результати апроксимації кривої методом множинної лінійної регресії

	Значення	Стандартна похибка	t	P> t
Константа	-14.43762	4.70239	-3.07027	0.20045
d	7.52178	1.45648	5.16435	0.12177
D	-1.65979	1.26857	-1.3084	0.41545
S	-0.31508	0.13725	-2.2957	0.26153

Відповідно до наведених вище результатів апроксимації, скориговане значення коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,9869$, що є цілком прийнятним показником точності моделі. Відповідне аналітичне вираження функції наведено у рівнянні (4.1):

$$F = -14.4376 + 3.54d - 0.009D^2 \tag{4.1}$$

З наведеного вище рівняння 4.1 чітко видно, що максимальне зусилля зсуву значно позитивно корелює з діаметром D перемішуючої гільзи, і негативно корелює з діаметром перемішуючої гільзи D². Таким чином, збільшення діаметра перемішуючої гільзи не є необмеженим збільшенням максимальної сили зсуву зони точкового зварювання, але можна показати, що збільшення діаметра перемішуючого стрижня може ефективно збільшити

навантаження руйнування при випробуванні на розтяг-зсув зони точкового зварювання.

У поєднанні з морфологією мікроструктури і формою зсувного руйнування зони точкового зварювання, а також рівняннями (4.1), можна зробити висновок, що відстань радіального потоку пластичного металу безпосередньо під стрижнем, що перемішує, вздовж зони точкового зварювання значно нижча, ніж відстань осевого потоку, і об'єм металу тут є ключем до ефективного заповнення. Об'єм цієї порожнини позитивно корелює з діаметром перемішуючої гільзи, і пластичний метал безпосередньо під перемішуючого стрижня повинен переміститися на відстань t в радіальному напрямку в процесі заповнення, щоб сформувати повну і ефективну зону точкового зварювання, як показано на рисунку 4.13.

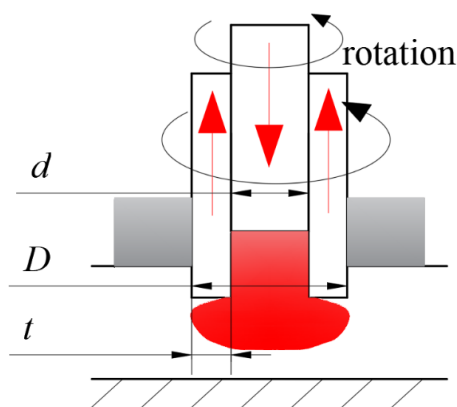


Рисунок 4.13 – Схематичне зображення радіального плинку пластичного металу в зоні точкового зварювання

Отже, коли діаметр стрижня перемішувального інструмента фіксований, діаметр гільзи повинен бути якомога меншим, тобто необхідно зменшити співвідношення діаметра гільзи до діаметра стрижня для ефективного підвищення максимальної сили зсуву в зоні точкового зварювання. Водночас, щоб забезпечити міцність і стабільність перемішувального інструмента, надто мале співвідношення діаметра гільзи до діаметра стрижня може легко призвести до пошкодження інструмента або до відмови точкового зварювання внаслідок значної деформації. Це також є ключовою проблемою, на яку слід

звертати увагу в інженерній практиці.

З метою подальшого дослідження впливу діаметра перемішуючого інструменту, швидкості обертання та швидкості проплавлення на максимальне зусилля зсуву в зоні точкового зварювання, а також взаємодії між цими факторами, вищевказані три параметри процесу обробляються методом поверхні відгуку, і з наведеної вище формули видно, що максимальне зусилля зсуву в основному корелює з максимальним квадратичним значенням цих факторів, а результати випробувань, представлені на рисунку 4.10, обробляються програмним забезпеченням Design-Expert 13. 0, а отримані дані наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати аналізу даних про вплив різних факторів на поперечну силу

Джерело	Сума квадратів	Ступінь вільності	Середнє квадратичне	F-значення	p-значення
Factor	145.74	9	16.19	127.40	< 0.0001
D	105.16	1	105.16	827.35	< 0.0001
ω	4.47	1	4.47	35.17	0.0006
ν	3.86	1	3.86	30.34	0.0009
$D\omega$	1.45	1	1.45	11.44	0.0117
$D\nu$	0.2281	1	0.2281	1.79	0.2222
$\omega\nu$	5.02	1	5.02	39.50	0.0004
D^2	7.72	1	7.72	60.71	0.0001
ω^2	10.51	1	10.51	82.71	< 0.0001
ν^2	4.47	1	4.47	35.20	0.0006
Залишок	0.8897	7	0.1271		
Відсутність відповідності	0.8897	6	0.1483		
Чиста помилка	0.0000	1	0.0000		
Всього	146.63	16			

Після оброблення наведених вище результатів було визначено вплив

різних діаметрів перемішувального інструмента та параметрів процесу точкового зварювання на максимальну силу зсувного розтягування в зоні точкового зварювання. Відповідне рівняння наведено у формулі (4.2).

$$F = -67.98 + 4.27D + 0.056\omega + 0.7\nu + 6.5e-04D\omega - 5.2e-03D\nu - 2.34e-04\omega\nu - 0.15D^2 - 2.059e-05\omega^2 - 5.4e-03\nu^2 \quad (4.2)$$

Відповідно до наведеного вище рівняння, його було імпортовано в програмне забезпечення Origin для побудови поверхні моделі. Відповідне зображення представлено на рисунку 4.14.

З рис. 4.14 видно, що контурні лінії сили зсуву є лівосторонніми еліпсами, причому червона еліптична область зміщується до правого нижнього кута зі збільшенням діаметра змішувача. Коли діаметр змішувача малий, параметри процесу, визначені експериментально, можуть охоплювати більшу зону дії зсувної сили; коли діаметр великий, вони не можуть повністю охопити зону дії максимальної зсувної сили, але все ж охоплюють найбільше її значення. Тобто, контурні лінії зони максимальної сили зсуву утворюють замкнений контур, як показано на рисунках 4.14 (а) і (б). Оскільки довга вісь контурної лінії представляє швидкість врізання, а коротка вісь - швидкість обертання, то параметри процесу для максимального зусилля зсуву отримані при менших швидкостях врізання незалежно від діаметра змішувача, і ця тенденція стає більш вираженою зі збільшенням діаметра. З поверхонь відгуку трьох різних факторів важко отримати високу силу зсуву при низькій швидкості обертання і більш високій швидкості проникнення. Однак не можна стверджувати, що чим менша швидкість проплавлення, тим краща сила зсуву, особливо при малому діаметрі змішувального інструменту, що може бути пов'язано з тепловиділенням в зоні точкового зварювання і текучістю пластичних металів. Конкретні причини будуть детально розглянуті в наступних розділах.

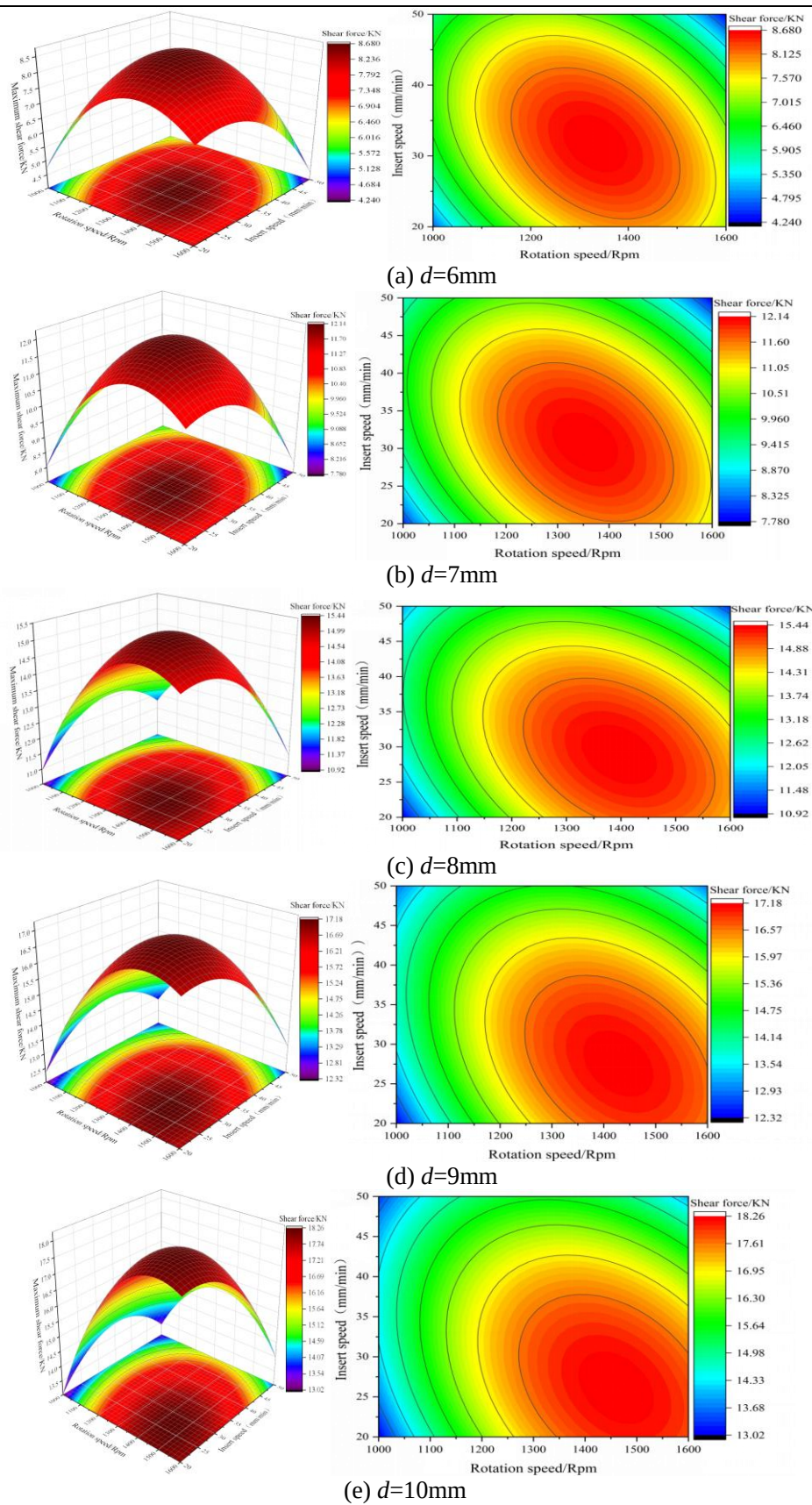


Рисунок 4.14 – Поверхня відгуку різних факторів на силу зсуву

Вищевказані явища вказують на те, що розмір діаметра перемішуючого інструменту, швидкість обертання і швидкість введення значно впливають на максимальну силу зсуву в зоні точкового зварювання. При відповідних параметрах процесу збільшення діаметра перемішуючого інструменту може помітно збільшити зусилля зсуву, як це повністю продемонстровано на рисунку 4.15.

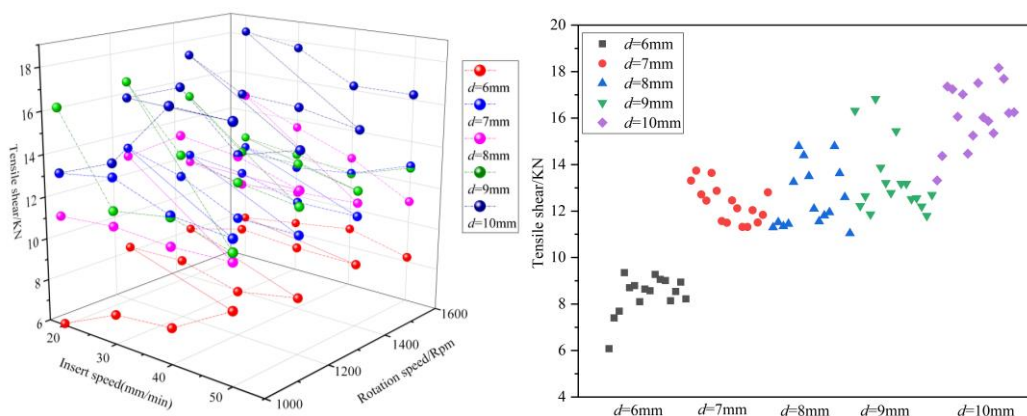


Рисунок 4.15 – Розподіл сили зсувного розтягування за різних параметрів процесу

Коли діаметр перемішуючого інструменту становить 6 мм, значення зусилля розтягування-зсуву в зоні точкового зварювання помітно менші, а максимальні зусилля розтягування-зсуву не перевищують 10 кН. Зі збільшенням діаметра перемішуючого інструменту просторовий розподіл максимального розтягуючого зусилля поступово розсіюється, що вказує на те, що вплив параметрів процесу на максимальне розтягуюче зусилля зростає. При діаметрі мішалки 7 мм розподіл максимальної сили розтягу-зсуву стає дуже концентрованим, досягаючи 81% значень сили розтягу-зсуву при різних параметрах процесу при діаметрі мішалки 8 мм і 9 мм, і перевищуючи деякі максимальні сили розтягу-зсуву при діаметрі мішалки 10 мм. Це явище не є поодиноким; наприклад, коли перемішуючий інструмент має діаметр 8 мм і обертається зі швидкістю 1200 об/хв, отримані значення сили зсуву вищі, ніж коли перемішуючий інструмент має діаметр 9 мм і обертається зі швидкістю

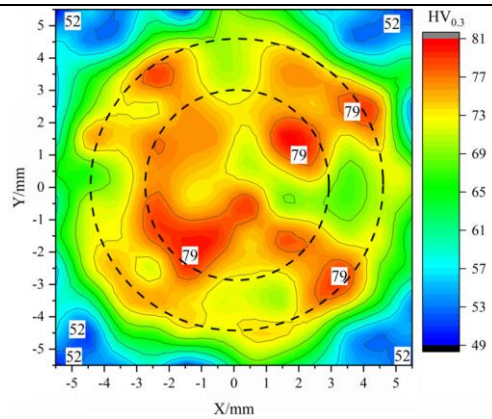
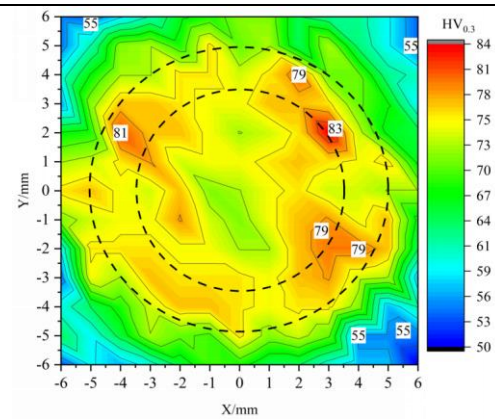
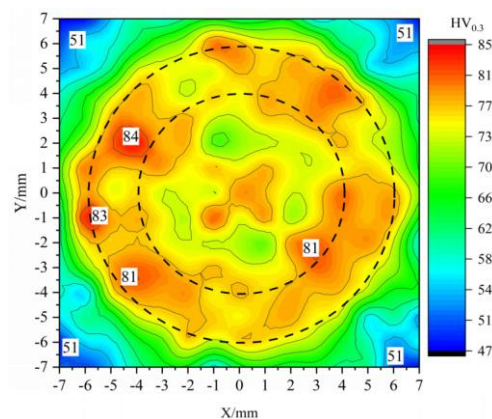
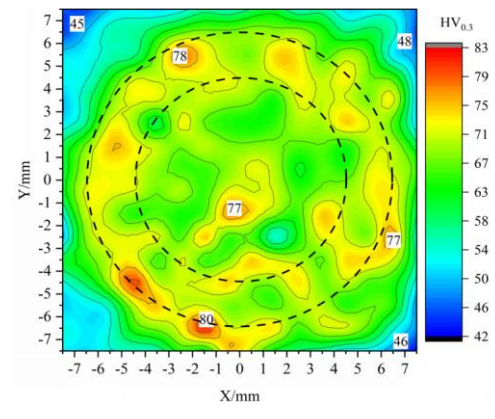
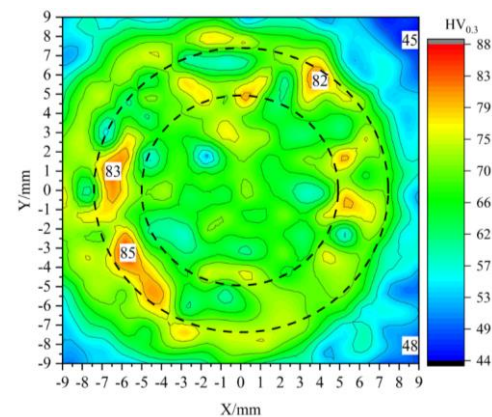
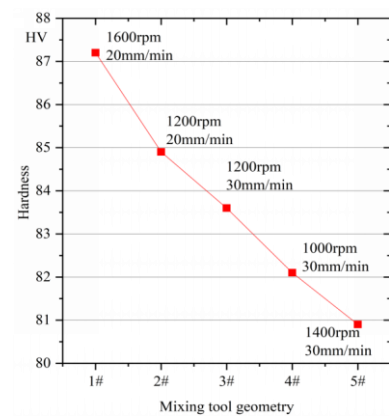
1600 об/хв. Крім того, коли перемішуючий інструмент має діаметр 9 мм, обертається зі швидкістю 1600 об/хв і проникає зі швидкістю 20 мм/хв, отримане максимальне значення сили зсуву більше, ніж більшість значень сили зсуву, коли перемішуючий інструмент має діаметр 10 мм. Це вказує на те, що менша швидкість проникнення, більша швидкість обертання і більший діаметр перемішуючого інструменту є необхідними і достатніми умовами для отримання вищих значень сили зсуву.

4.3 Зв'язок між розподілом твердості та інструментом перемішування

4.3.1 Розподіл твердості верхньої поверхні

Мікротвердість є важливим показником для оцінки продуктивності зон точкового зварювання. Вища твердість покращує зносостійкість і стійкість до деформації. На мікротвердість впливає розмір зерна і температура; менші зерна сприяють підвищенню твердості, тоді як високі температури викликають розм'якшення, відоме як високотемпературний відпал, що особливо важливо для термооброблюваного алюмінієвого сплаву 6061-T6. На основі отриманих даних виберіть параметри процесу, які дають максимальне зусилля зсуву, і перевірте мікротвердість верхньої поверхні та поперечного перерізу зони точкового зварювання, а конкретні результати показані на рисунку 4.16.

Контур розподілу твердості верхньої поверхні зони точкового зварювання близький до кругового, показуючи розподіл високої окружності центру кола, що поступово зменшується, а максимальна твердість в основному розподіляється в зоні впливу перемішуючої гільзи. Зі збільшенням діаметра перемішуючого інструменту максимальний розподіл твердості віддаляється від центру точкового зварювання, і його максимальне значення поступово збільшується, а рівномірність розподілу також поступово зменшується, і значення твердості перемішуючого інструменту нижче, ніж у основного металу, як показано на рисунку 4.16.

(a) $d=6$ мм(b) $d=7$ мм(c) $d=8$ мм(d) $d=9$ мм(e) $d=10$ мм

(f) Твердість при різних інструментах для перемішування

Рисунок 4.16 – Розподіл мікротвердості на верхній поверхні

Розподіл твердості зони точкового зварювання при різних діаметрах інструменту в основному відповідає мікроморфології його верхньої поверхні, значення мікротвердості в зоні впливу перемішуючої гільзи вище, ніж в

навколишній зоні, а значення твердості зони термічного впливу найнижче, що становить лише половину твердості основного металу, яка в основному підтримується між 45HV_{0,3} і 55HV_{0,3}, що стає більш очевидним зі збільшенням діаметра перемішуючого інструменту. Згідно з аналізом, на метал в зоні термічного впливу впливає лише висока температура, і відбувається очевидний відпал, що призводить до зниження значення його твердості.

Значення мікротвердості в зоні термомеханічного впливу знаходяться між показниками зони термічного впливу та зони перемішування і становлять приблизно 60 HV_{0.3}, розподіляючись у вигляді концентричних кілець. Аналіз свідчить, що ця область зазнала рекристалізаційного відпалу внаслідок механічного впливу та високих температур, що виражено сильніше, ніж у зоні термічного впливу. Однак внаслідок механічного стиснення зерна фрагментуються на більш дрібні зернисті структури, збільшуючи значення мікротвердості. Тому ця ділянка має вищу твердість, ніж зона термічного впливу, з ще вищою твердістю біля серцевини шва через більш значне механічне стиснення. Зі збільшенням діаметра перемішуючого інструменту значення мікротвердості не збільшуються, але зона, що підтримує цю твердість, розширюється - від 1 мм для інструменту діаметром 6 мм до 2 мм для інструменту діаметром 10 мм. Це вказує на те, що збільшення діаметра перемішуючого інструменту збільшує площу зони термічного впливу, що пов'язано з механічними силами, які генеруються на зовнішній стороні інструменту.

Хоча в попередніх розділах зазначено, що зерна в зоні термічного впливу менші, ніж у зоні перемішування, а температурний вплив у цих зонах є подібним, мікротвердість у ТВ не є вищою. Аналіз показує, що пік твердості спостерігається у зоні поєднання тертевого перемішування і заклепкового з'єднання, де відбувається найінтенсивніше подрібнення зерен, що призводить до формування найменших зерен у всій зоні перемішування. Саме це й зумовлює підвищене значення мікротвердості. Однак через малу ширину цієї зони та її близькість до зони активного зрушення, на карті твердості цей пік

проявляється як частина зони ЗВГ.

4.3.2 Вплив діаметра перемішувального інструмента на твердість зони перемішування

У цьому дослідженні розглядається алюмінієвий сплав 6061-Т6, термооброблюваний алюмінієвий сплав, мікротвердість якого залежить від температури, причому діаметр перемішуючого інструменту суттєво впливає на тепловіддачу. Тому дуже важливо дослідити вплив мішалки на мікротвердість.

На рисунку 4.17 показані карти розподілу мікротвердості по перерізу зони перемішування при різних діаметрах перемішуючого інструменту.

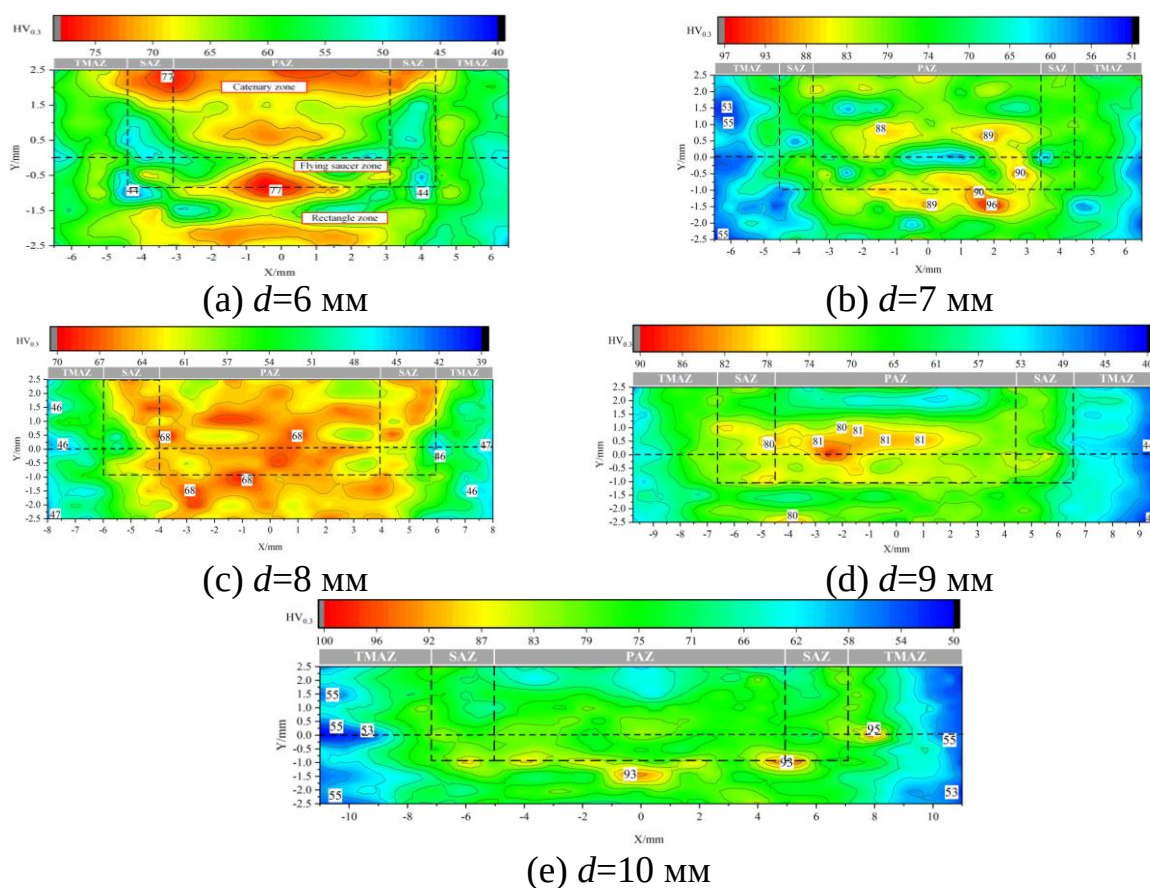


Рисунок 4.17 – Розподіл мікротвердості зони точкового зварювання в поперечному перерізі

Форма розподілу мікротвердості в основному відповідає морфології мікроструктури, але зона, де змінюються значення мікротвердості, значно більша, ніж зона точкового зварювання. Це пов'язано з тим, що до зони

перемішування підводиться велика кількість тепла, що спричиняє значні зміни значень твердості в зоні термічного впливу, як показано на рисунку 4.17(a). Загалом, значення мікротвердості в поперечному перерізі зоні перемішування вищі у верхньому шарі, ніж у нижньому, і вищі в середині, ніж з обох боків по горизонталі. У певних конкретних областях значення мікротвердості помітно вищі, як показано на рисунках 4.17(d) і 4.17(e), і ці області в основному зосереджені в нижній частині області, на яку найбільше впливає перемішувача гільза. На рисунку 4.18 показано розподіл твердості при перемішуванні інструментом при $d = 6$ мм.

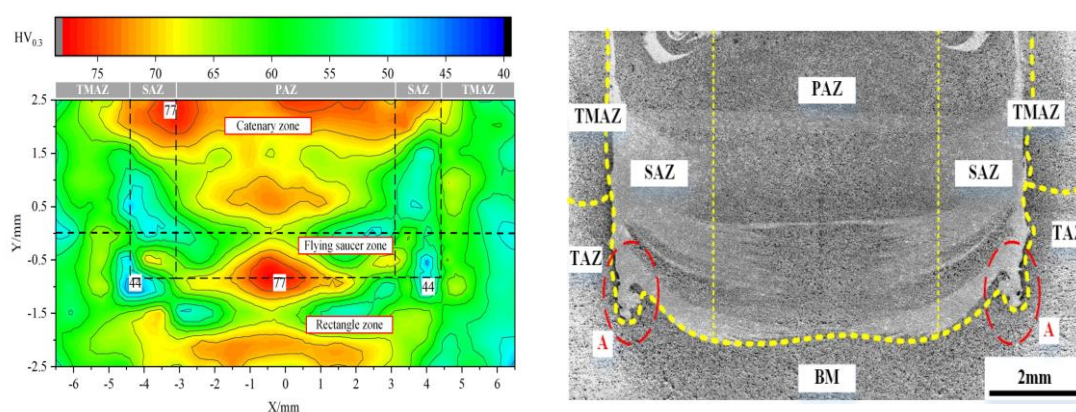


Рисунок 4.18 – Розподіл мікротвердості в поперечному перерізі ($d=6$ мм)

Рисунок 4.18 показує, що різні області відповідають різним розподілам твердості, причому твердість поперечного перерізу значною мірою визначається конкретною зоною. Верхній шар, як правило, має вищу твердість, утворюючи зону високої твердості у формі контактної мережі, яка проходить через зону зварного шва, а її нижня частина збігається з межею розділу між верхньою і нижньою пластинами. Центр зони впливу мішалки має найвищу твердість, утворюючи розподіл у формі «дископодібної зони», яка з'єднується з зоною контактної мережі зверху і контактує з основним матеріалом знизу. Під нею в основному матеріалі з'являється прямокутна зона високої твердості, ширина якої дорівнює ширині гільзи і стрижня. По обидва боки «дископодібна зона» є симетричні зони низької твердості на краю області, що зазнала впливу

плеча, відомі як «краплинні зони», які є основними областями, де утворюються мікропори і демонструють найнижчу твердість, як показано в області А на рисунку 4.18. Однак зі збільшенням діаметра твердість у цій зоні значно зростає, зрештою стаючи найвищою, коли діаметр досягає 15 мм - навіть перевищуючи твердість основного матеріалу. Згідно з попереднім аналізом, ця зона зазнає найсильнішого механічного впливу і має найдрібніше зерно. При використанні інструменту меншого діаметру в цю зону потрапляє недостатня кількість пластичного металу, що призводить до утворення мікропорожнеч і поганого заповнення, в результаті чого знижується твердість. Зі збільшенням діаметра інструменту потік металу покращується, заповнення стає більш щільним, а подрібнення зерна призводить до підвищення твердості.

Як показано на рисунках 4.17 і 4.18, ділянки з високою твердістю в основному розташовані в зоні наплавленого металу. Зона впливу мішалки постійно демонструє високу твердість, в той час як зона впливу уступу може мати зони низької твердості, якщо діаметр інструменту невеликий. Це пояснюється тим, що під безпосередньою дією перемішуючого інструменту пластичний метал піддається подрібненню зерна під впливом високої температури та інтенсивних механічних зусиль, що призводить до підвищення твердості. Аналогічно, хоча основний матеріал під зоною зварювання безпосередньо не перемішується, він зазнає сильного стиснення, що призводить до подрібнення зерна і відносно більшої твердості порівняно з навколишніми ділянками - звідси і прямокутна форма цієї області високої твердості. Однак ці значення твердості залишаються нижчими, ніж у основного матеріалу, через термічне розм'якшення, спричинене значним відпалом.

Загалом, зі збільшенням діаметра перемішуючого інструменту твердість як верхньої поверхні, так і поперечного перерізу точкового зварного шва покращується, а зона високої твердості розширюється. На верхній поверхні твердість найвища в центрі і нижча з обох боків, причому зона впливу стрижня має нижчу твердість, ніж зону впливу гільзи. Поперечний переріз показує

розподіл більш високої твердості вгорі і в центрі, і більш низької твердості внизу і з боків, що тісно пов'язано з рухом перемішуючого інструменту всередині заготовки. Загальна твердість нижча за твердість основного матеріалу через значні ефекти відпалу, незважаючи на подрібнення зерна, причому покращення спостерігається лише в певних зонах при більшому діаметрі інструменту.

4.4 Аналіз втоми зони точкового зварювання

З розвитком технологій країни висувають все більш високі вимоги до інженерного обладнання щодо терміну служби, безпеки та економічної ефективності. Багатоциклова втома стала однією з основних форм пошкодження. Одночасно з цим, прогрес у методах визначення характеристик матеріалів стимулював дослідження механізмів втомного руйнування. Починаючи з 1990-х років, виходячи з практичних інженерних потреб, такі компоненти, як літаки, швидкісні поїзди та автомобілі, повинні мати надвисоку втомну довговічність, здатну витримувати до 1010 циклів навантаження.

Виходячи з кількості циклів навантаження при втомі, повний термін служби металу в умовах втоми поділяється на чотири стадії: втома при дуже великій кількості циклів, втома при великій кількості циклів, втома при малій кількості циклів [95] та поширення тріщини, як показано на рисунку 4.19.

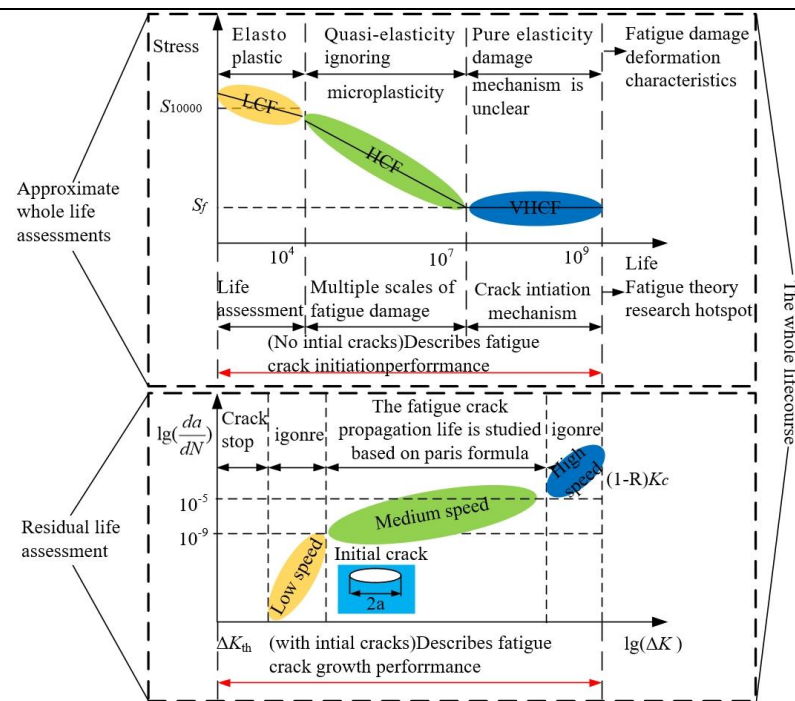


Рисунок 4.19 – Життєвий цикл втомного пошкодження металу [96]

Досліджуване в цій роботі з'єднання з алюмінієвого сплаву, отримане методом повторного тертєвого точкового зварювання з перемішуванням, переважно використовується в конструкціях літаків, швидкісних потягів та автомобілів, де висуваються підвищені вимоги до якості з'єднань. Саме тому проведення випробувань на втому є необхідним.

Оскільки зразки, виготовлені за різних параметрів процесу, мають однакові геометричні розміри, ресурс втоми при різних рівнях напруження оцінюється шляхом контролю прикладеного навантаження. Випробування виконувались згідно з методикою, описаною в розділі 2, при співвідношенні напруг $R = -1$.

Відповідно до значення сили розтягуючого зсуву, наведеного в попередньому розділі, можна побачити, що сила розтягуючого зсуву є найменшою в параметрах процесу з найменшим діаметром перемішуючого інструменту, і її мінімальне значення не перевищує 6 кН, і сила розтягу також є найбільшою, коли діаметр мішалки є найбільшим, і її значення в основному становить 18 кН, щоб гарантувати, що діаметр кожної мішалки може бути в

межах діапазону високої циклічної втоми , і в той же час, згідно з висновком, зробленим іншими дослідниками, мінімальне навантаження встановлюється на рівні не більше 5% від максимальної сили розтягування. Максимальне навантаження не перевищує 50% від мінімального розтягувального зусилля, і відповідно до цього діапазону встановлюються три різні циклічні навантаження, а саме: 1 кН, 2 кН і 3 кН, а цикл навантаження становить 1с. Випробування на втомну міцність проводиться відповідно до цих параметрів, а конкретні результати випробувань наведені в таблиці 4.4.

З точки зору циклів втомного навантаження (рис. 4.20, 4.21), за різних умов навантаження втомна довговічність збільшується з діаметром перемішуючого інструменту, демонструючи тенденцію, що відповідає максимальному зусиллю зсуву в зоні зварного шва, як показано на рисунку 4.22.

Таблиця 4.4 –Кількість циклів втоми в зоні точкового зварювання

Стрижень	d=6mm	d=7 mm	d=8 mm	d=9 mm	d=10 mm
Навантаження					
1кН	541965	356282	474343	650000	1000000
Місце руйнування	Нижній	Нижній	Нижній	Верхній	Верхній
2кН	89262	94386	104070	98546	95148
Місце руйнування	Нижній	Верхній	Нижній	Верхній	Верхній
3кН	17475	8595	22998	17971	28717
Місце руйнування	Відрив точки зварювання	Зсувне руйнування	Верхній	Нижній	Нижній

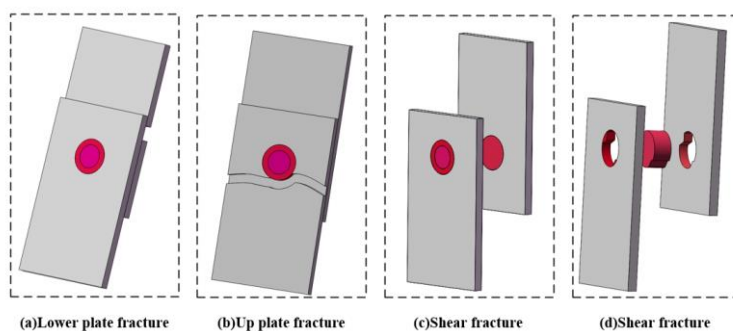


Рисунок 4.20 – Схематичне зображення типових форм втомного руйнування в точковому зварному шві

Оскільки випробування в основному підпадають під режим багатоциклової втоми - особливо при навантаженні 1 кН за допомогою перемішуючого інструменту діаметром 10 мм - матеріал зазнає переважно квазіпружної деформації, тому втомна довговічність тісно пов'язана з межею міцності на розтягнення-зсув у зоні зварного шва [97].

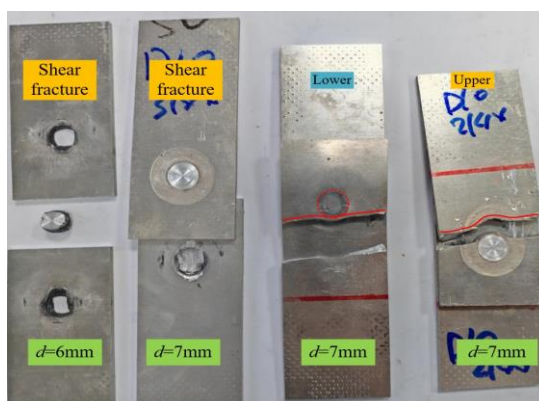
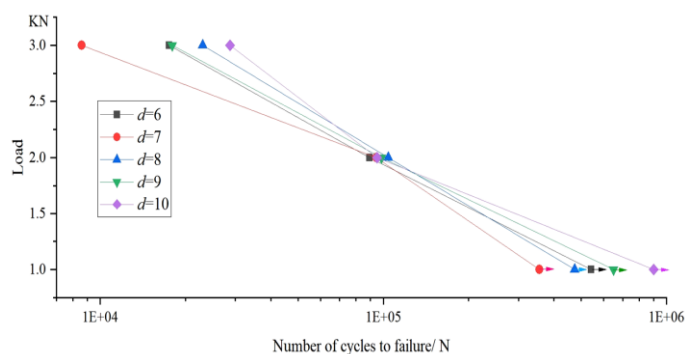


Рисунок 4.21 – Типове втомне руйнування в зоні точкового зварного шва



(L – прикладене навантаження, N – кількість циклів до руйнування)
Рисунок 4.22 – Криві L-N для різних діаметрів перемішувального інструмента

Поверхні втомного руйнування були розташовані поблизу зони термічного впливу, з режимами і розташуванням руйнування, подібними до тих, що спостерігаються при руйнуванні на розтягнення-зсув. Коли діаметр перемішуючого інструменту був ≤ 8 мм і циклічне навантаження було низьким, руйнування переважно відбувалися в нижньому листі. Коли діаметр перевищував 8 мм, руйнування, як правило, відбувалися у верхньому листі за низьких циклічних навантажень, а в нижньому листі - за вищих навантажень. Зокрема, при навантаженні 3 кН інструмент діаметром 6 мм призвів до руйнування з відривом пробки, тоді як інструмент діаметром 7 мм спричинив зсувний злам. Така поведінка пояснюється тим, що руйнування нижніх листів є результатом втомних тріщин, які виникають у слабких місцях зварного шва, що відповідає механізмам руйнування при розтягуванні-зсуві. На відміну від цього, розриви верхнього листа спричинені концентрацією напружень на межі розділу між зварним з'єднанням «фрикційна пробка-зварний шов» і навколишньою зоною термічного впливу, де тріщини можуть легко зароджуватися і поширюватися - особливо, коли діаметр інструменту великий, а прикладеного навантаження недостатньо для того, щоб викликати пластичну деформацію. Зсувні тріщини виникають, коли втомне навантаження досягає приблизно 40% від максимальної межі міцності з'єднання на розтягнення-зсув, достатньої для того, щоб викликати значну пластичну деформацію, а форма втомного навантаження дуже нагадує навантаження на розтягнення-зсув. Це призводить до низької втомної довговічності і морфології руйнування, подібної до руйнування при зсуві.

Загалом, більший діаметр мішалки залишається ключовим фактором для підвищення втомної довговічності. За низьких навантажень зменшення концентрації напружень у зоні зварного шва сприяє збільшенню втомної довговічності, тоді як за високих навантажень критично важливим є підвищення межі міцності на розтягнення-зсув зварного шва. У реальних умовах точкові зварні шви часто піддаються складним навантаженням, в тому числі скручуванню, зумовленим розташуванням конструкції та умовами

експлуатації. Для подальшого дослідження впливу навантаження на скручування на втомну довговічність були проведені випробування на втому від скручування шляхом прикладання крутних моментів 1 Нм, 2 Нм і 3 Нм з обох боків точково зварених зразків, з періодом циклу кручення 1 секунда. Отримані режими руйнування та втомна довговічність представлені нижче.

На рисунку 4.23 показано, що зі збільшенням крутного моменту та діаметра переміщувального інструмента положення втомного руйнування зміщується з верхньої пластини до нижньої. Загалом, ресурс втоми (у кількості обертів) зростає зі збільшенням діаметра інструмента, особливо за умов низького крутного моменту. Водночас спостерігаються аномальні зниження ресурсу втоми: при діаметрі 8 мм за навантаження 1 Н·м та при діаметрі 10 мм за навантаження 3 Н·м.

	d=6mm	d=7mm	d=8mm	d=9mm	d=10mm
1NM	141145 Upper	310558 Upper	183215 Upper	328519 Upper	341987 Lower
2NM	21135 Upper	24870 Upper	25339 Upper	28201 Lower	39277 Lower
3NM	1383 Lower	4758 Lower	8508 Lower	9420 Lower	3894 Lower

Рисунок 4.23 – Положення втомного руйнування при крутному навантаженні та ресурс роботи

За різних значень крутного навантаження втомні руйнування показують, що при діаметрі інструмента 6 мм усі зразки руйнуються за типом виривання стрижня (plug pull-out). При діаметрах 7 мм і 8 мм із підвищенням навантаження характер руйнування змінюється від зсуву під кутом 45° до виривання стрижня. Для інструментів діаметром 9 мм і 10 мм спостерігається перехід від зсувного руйнування під кутом 45° до розриву стрижня (plug tearing). В обох випадках для інструмента 10 мм руйнування відбувається в

нижній пластині (рис. 4.24).

Відповідно до кількості циклів втоми при крутному навантаженні, менші перемішувальні інструменти формують меншу зварну площу, що призводить до більших кутів закручування під навантаженням. Це викликає значні пластичні деформації, які, у свою чергу, спричиняють руйнування за типом виривання кнопки та зменшення ресурсу втоми. Навіть при використанні інструмента діаметром 8 мм виривання кнопки все ще спостерігається за вищих крутних навантажень.

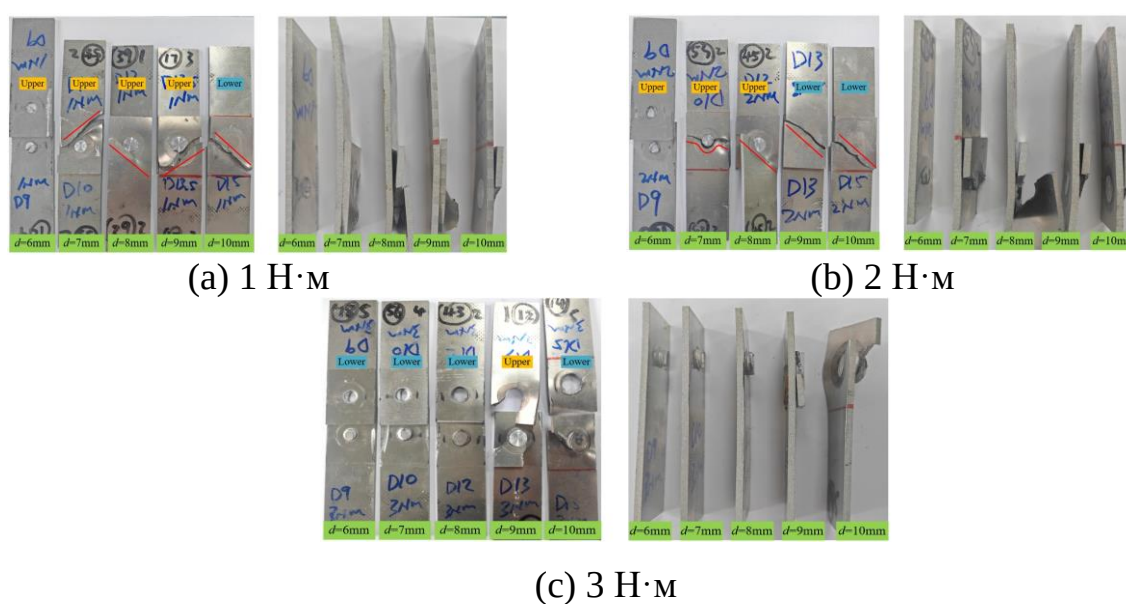


Рисунок 4.24 – Положення втомного зламу при крученні для різних діаметрів інструменту

Із збільшенням діаметра інструмента зварна площа зростає, що підвищує крутну жорсткість і зменшує кут закручування. Хоча деформація відтерміновується, концентрація напружень у зоні зварювання все ще може ініціювати мікротріщини, які з часом призводять до розриву кнопки та її виривання.

Для інструментів діаметром 9 мм і 10 мм характер руйнування подібний; однак інструмент 9 мм зазвичай спричиняє руйнування у верхньому листі, тоді як 10 мм - у нижньому. Більша зварна площа інструмента 10 мм забезпечує вищу жорсткість, мінімізуючи різницю кутів між листами, що пояснює

подібний ресурс втоми за низьких крутних навантажень. Через високу жорсткість усе зварне з'єднання обертається разом із прикладеним навантаженням, і руйнування відбувається в більш слабкому нижньому листі, що узгоджується з механізмами відмов, спостереженими при втомі на розтяг-зсув і при осьовому навантаженні [98].

4.6 Висновки до розділу

У цьому розділі було проведено дослідження характеристик з'єднань, отриманих методом повторного тертевого точкового зварювання з перемішуванням (ТЗТЗП), з акцентом на зсувну міцність, мікротвердість і втому при навантаженні. Отримані результати дозволили сформулювати такі висновки:

1. Діаметр перемішувального інструмента впливає на максимальну зсувну міцність у зоні точкового зварювання. Збільшення діаметра за умови оптимальних параметрів процесу дозволяє досягти вищої зсувної міцності. При меншому діаметрі інструмента в межах допустимого коливання тепловкладення всі параметри забезпечують хорошу міцність; натомість при більшому діаметрі потрібне значне тепловкладення.

2. У зоні ТЗТЗП з'єднання, утворені інструментами меншого діаметра, схильні до руйнування по поверхні з'єднання або до виривання виступу, тоді як при більшому діаметрі зазвичай спостерігається часткове руйнування виступу. Гачок (hook) виступає як ініціатор тріщини; зона тертевого заклепкового з'єднання концентрує напруження, спрямовуючи поширення тріщини, однак відзначається високими характеристиками, що ускладнюють її руйнування. Зони розм'якшеного основного матеріалу по обидва боки в нижній частині є місцем остаточного руйнування, що призводить до відшарування, хоча наявність ЗЛЗ (зони з'єднання залишкової лінії) не впливає на зсувну міцність.

3. Зона ТЗТЗП зазнає рекристалізаційного відпалу, внаслідок чого її мікротвердість нижча за твердість основного матеріалу. Найвища твердість на

поверхні спостерігається в зоні активного зрушення, найнижча - в зоні термічного впливу. У поперечному перерізі найбільше значення має зона пластичної деформації, а найменше знову в зоні термічного впливу. Зона крапельної структури є особливою: при малому діаметрі інструмента її твердість найнижча, а при великому - найвища.

4. Кількість циклів до втомного руйнування у зонах ТЗТЗП зростає зі збільшенням діаметра інструмента. У випадку крутного навантаження збільшення діаметра покращує ресурс тільки за умови відповідного навантаження, тобто є необхідною, але не достатньою умовою для підвищення крутної витривалості; однак за низьких крутних навантажень збільшення діаметра стає достатньою умовою для покращення ресурсу.

РОЗДІЛ 5 АНАЛІЗ ТЕПЛОУТВОРЕННЯ ТА СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЗТЗП

5.1 Вступ

Формування ТЗТЗП є складним процесом, на який впливають діаметр інструменту для перемішування, швидкість обертання, швидкість проникнення та температура. Ці фактори призводять до значних відмінностей у його внутрішній структурі, що впливає на зовнішні характеристики. Для кращого розуміння процесу ТЗТЗП та внутрішнього потоку пластичного металу в цьому розділі використовуються розрахунки теорії температурного поля та математичне моделювання. З огляду на те, що ТЗТЗП передбачає теплопровідність та значну пластичну деформацію, подібну до гарячого кування та гарячого екструдуювання, для аналізу використовується програмне забезпечення DeformV11.0, відоме своїми можливостями моделювання термопластичного формування [94].

5.2 Створення математичної моделі

5.2.1 Налаштування параметрів імітаційної моделі

Відповідно до фактичного розміру зварювального матеріалу, розмір матеріалу для математичного моделювання встановлюється відповідно до фактичного розміру, конститутивна модель матеріалу може бути описана рівнянням Арреніуса, а взаємозв'язок між реальним напруженням σ , температурою T та швидкістю деформації $\dot{\epsilon}$ може бути виражений як 5.1 [99-106].

$$\bar{\epsilon} = A [\sinh(\alpha \bar{\sigma})]^n \exp[-\Delta H / RT_{abs}] \quad (5.1)$$

де:

A - Коефіцієнт структури, значення $1.15e + 17$;

α - параметр рівня напруженості, значення 0.00882 ;

ΔH - енергія іскри, значення 228620 Дж/моль;

N - показник напруженості, значення 28.068;

R - газова стала 8,314 Дж/(моль-К).

Характеристики тертя між перемішувальним інструментом і матеріалом виражаються у вигляді змішаного кулонівського тертя і зсувного тертя, де коефіцієнт кулонівського тертя f_k фіксований на рівні 0,2, а зсувне тертя визначається за формулою (5.2)

$$f_{\mu} = m\tau \quad (5.2)$$

де:

M - Коефіцієнт тертя зсуву;

τ - напруга зсуву потоку матеріалів.

Згідно з даними, наведеними в літературі з параметрів, коли температура нижча за 475 °С, $m = 0,32$ залишається постійним; коли температура вища за 475 °С, осаджена фаза алюмінієвого сплаву 6061-T6 починає плавитися локально, і m лінійно зменшується. Коли температура матеріалу піднімається до 532 °С, матеріал в цілому починає плавитися, а m падає до 0 [99].

При фактичному зварюванні температура навколишнього середовища і початкова температура основного матеріалу становлять 20 ° С. Для забезпечення точності випробувань перед кожним випробуванням проводиться точкове зварювання для стабілізації температури обладнання, особливо для опорної плити і перемішувального інструменту. Конкретні параметри наведені в таблиці 5.1.

Швидкість обертання, швидкість заглиблення та максимальний діаметр перемішувального інструмента моделюються відповідно до значень, обраних у попередніх розділах. Конкретні параметри наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.1 – Основні фізичні параметри основного металу та інструменту для його перемішування

Тип	Метал	Пластина	Стрижень	Гільза (Гільза)	Кільце
Початкова температура /°C Стан матеріалу (властивість стану)	20 Пластичний	100 Жорсткий	450 Жорсткий	450 Жорсткий	425 Жорсткий
Коефіцієнт теплопровідності	0.5	6	11	11	11
Модуль Юнга	68900	212000	212000	212000	212000
Коефіцієнт Пуассона	0.33	0.3	0.3	0.3	0.3
Теплове розширення ($\times 10^{-5}$)	2.2	1.25	1.25	1.25	1.25
Теплопровідність	180	43.4	43.4	43.4	43.4
Питома теплоємність Дж/(кг·°C)	880	4430	2430	2430	2430
Теплове випромінювання	0.9	0.7	0.7	0.7	0.7

Таблиця 5.2 – Параметри для модулювання

Діаметр	$d = 6$	$d = 7$	$d = 8$	$d = 9$	$d = 10$
Параметри процесу	$\omega = 1400 \text{ об/хв}$ $v = 30 \text{ мм/хв}$	$\omega = 1000 \text{ об/хв}$ $v = 30 \text{ мм/хв}$	$\omega = 1200 \text{ об/хв}$ $v = 30 \text{ мм/хв}$	$\omega = 1200 \text{ об/хв}$ $v = 20 \text{ мм/хв}$	$\omega = 1600 \text{ об/хв}$ $v = 20 \text{ мм/хв}$

Для спрощення розрахунків верхню та нижню пластини розглядають як одну суцільну пластину. Співвідношення розмірів елементів сітки між зоною точкового зварювання та іншими ділянками становить 1:10. Максимальна швидкість заглиблення становить 30 мм/хв, що відповідає максимальному переміщенню 0,5 мм/с. Таким чином, найменший розмір елемента сітки має бути меншим за 0,17 мм, як показано на рисунку 5.1. Відповідні налаштування

та переміщення наведено на рисунку 5.2.

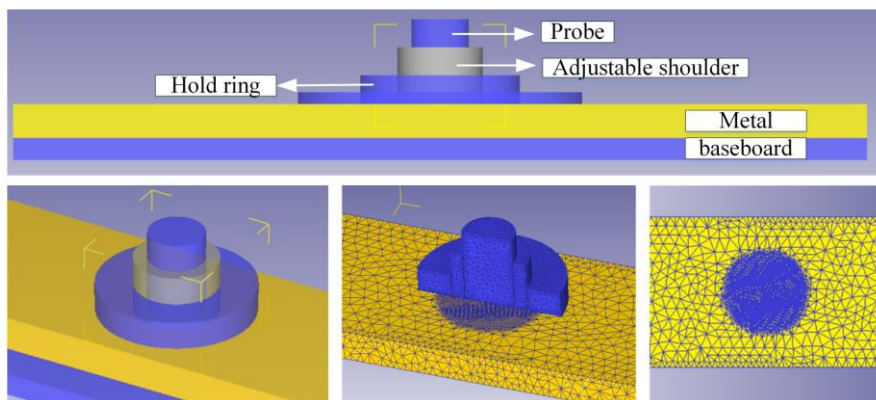


Рисунок 5.1 – Схематичне зображення відносного розташування та сіткової розбивки

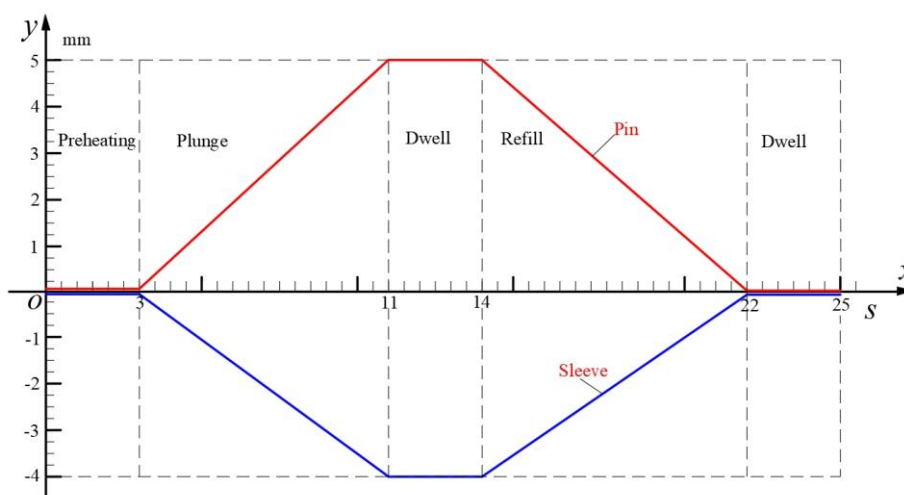


Рисунок 5.2 – Налаштування швидкості перемішування

5.2.2 Побудова сітки

Перевірка незалежності від сітки має велике значення в симуляційному аналізі, оскільки вона не лише забезпечує точність і достовірність результатів моделювання, а й ефективно оптимізує обчислювальні ресурси та спрямовує стратегії побудови сітки, щоб забезпечити надійну основу для прийняття рішень у практичних застосуваннях, як показано на рисунку 5.3.

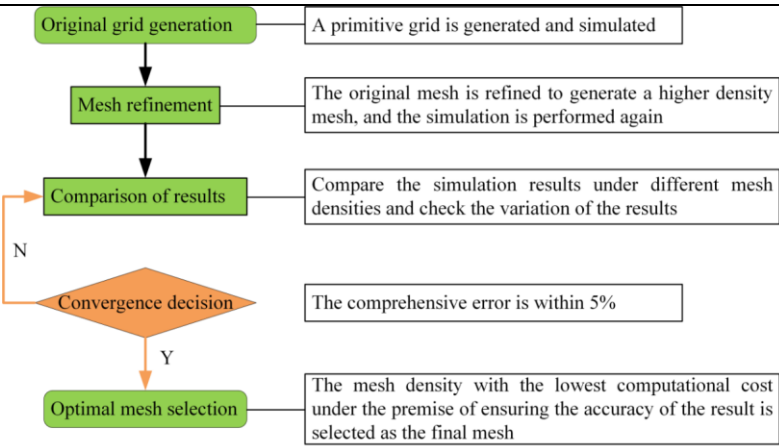
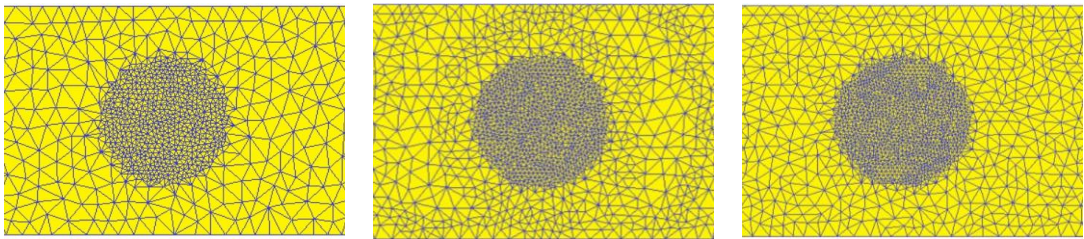


Рисунок 5.3 – Кроки для перевірки незалежності від сітки

Для випробування сітки, як об’єкт моделювання, використовується перемішувальний інструмент діаметром 8 мм, а мінімальні розміри елементів встановлюються відповідно до вищезазначених вимог до сітки і становлять 0,12 мм, 0,14 мм та 0,17 мм відповідно (рис. 5.4).

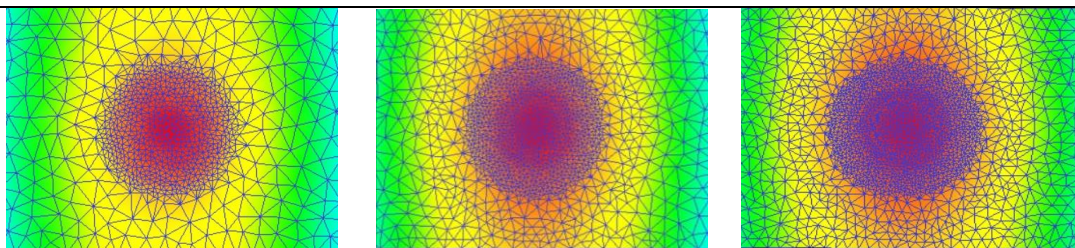


(a) size is 0.17mm (b) size is 0.14mm (c) size is 0.12mm

Рисунок 5.4 – Складання сітки з різними мінімальними розмірами елементів

Відповідно до параметрів, зазначених у попередньому розділі, проведено симуляційний аналіз, а конкретні результати моделювання наведено на рисунку 5.5.

З рисунка 5.5 видно, що за різних мінімальних розмірів елементів були отримані хороші результати формування, без суттєвих відмінностей у фінальній формованій поверхні. У цьому дослідженні оптимальним варіантом був обраний мінімальний розмір елемента 0,14 мм.



(a) розмір 0.17 мм (b) розмір 0.14 мм (c) розмір 0.12 мм

Рисунок 5.5 – Складання сітки з різними мінімальними розмірами елементів

Порівняння між поверхнею моделювання та фактичною точкою показало високу відповідність отриманих результатів (рис. 5.6).

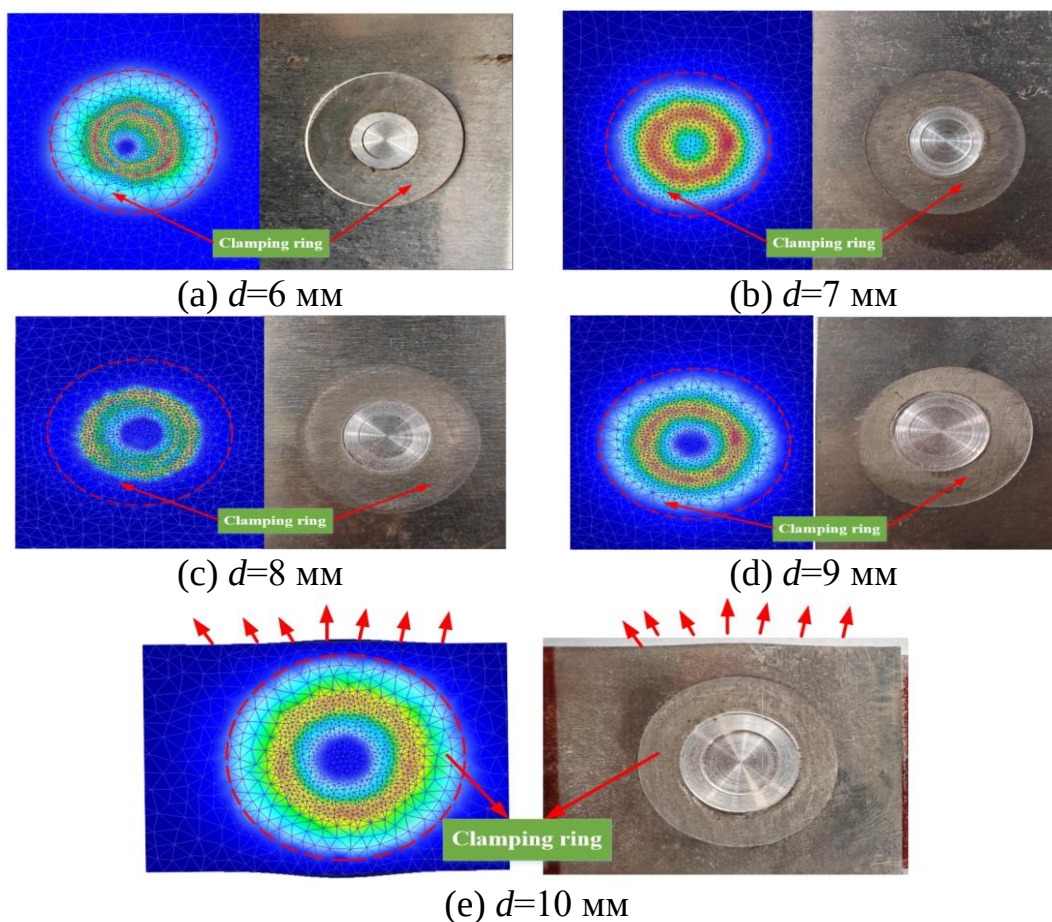


Рисунок 5.6 – Порівняння між поверхнею моделювання та фактичною точкою

Контури та геометричні характеристики змодельованої поверхні майже повністю збігаються з експериментальними даними. Це свідчить про достовірність обраної моделі та правильність параметрів сітки.

5.3 Аналіз результатів математичного моделювання

5.3.1 Математичне моделювання аналізу температурного поля

Відповідно до вищезазначених параметрів моделювання, для моделювання та розрахунків використовується 64-бітний комп'ютер моделі G7 виробництва Dell, а для паралельної роботи використовується 32-бітний 4-ядерний процесор. Фактична точка вимірювання температури показана на рисунку 5.7, а точки А і В є точками вимірювання температури відповідно.

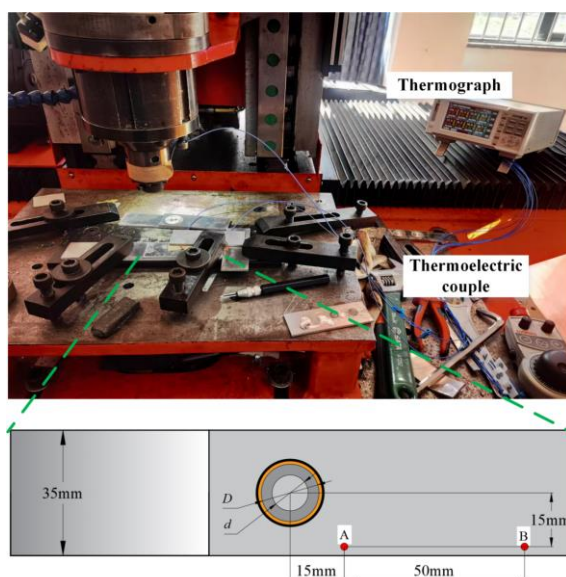


Рисунок 5.7 – Схематична діаграма вимірювання температури під час ТЗТЗП

Закон розподілу температурного поля, отриманого при різних діаметрах перемішувального інструмента, загалом однаковий: температура в зоні точкового зварювання є високою, а при віддаленні від неї поступово знижується. У процесі точкового зварювання температура в зоні зварювання спочатку має тенденцію до зростання, потім плавно коливається і знижується; при цьому на різних етапах спостерігаються помітні відмінності. Пікова температура зростає зі збільшенням діаметра перемішувального інструмента і досягається на етапі, коли зупинка майже завершена; зміни температурного поля на кожному етапі залежать від діаметра перемішувального інструмента, як показано на рисунку 5.8.

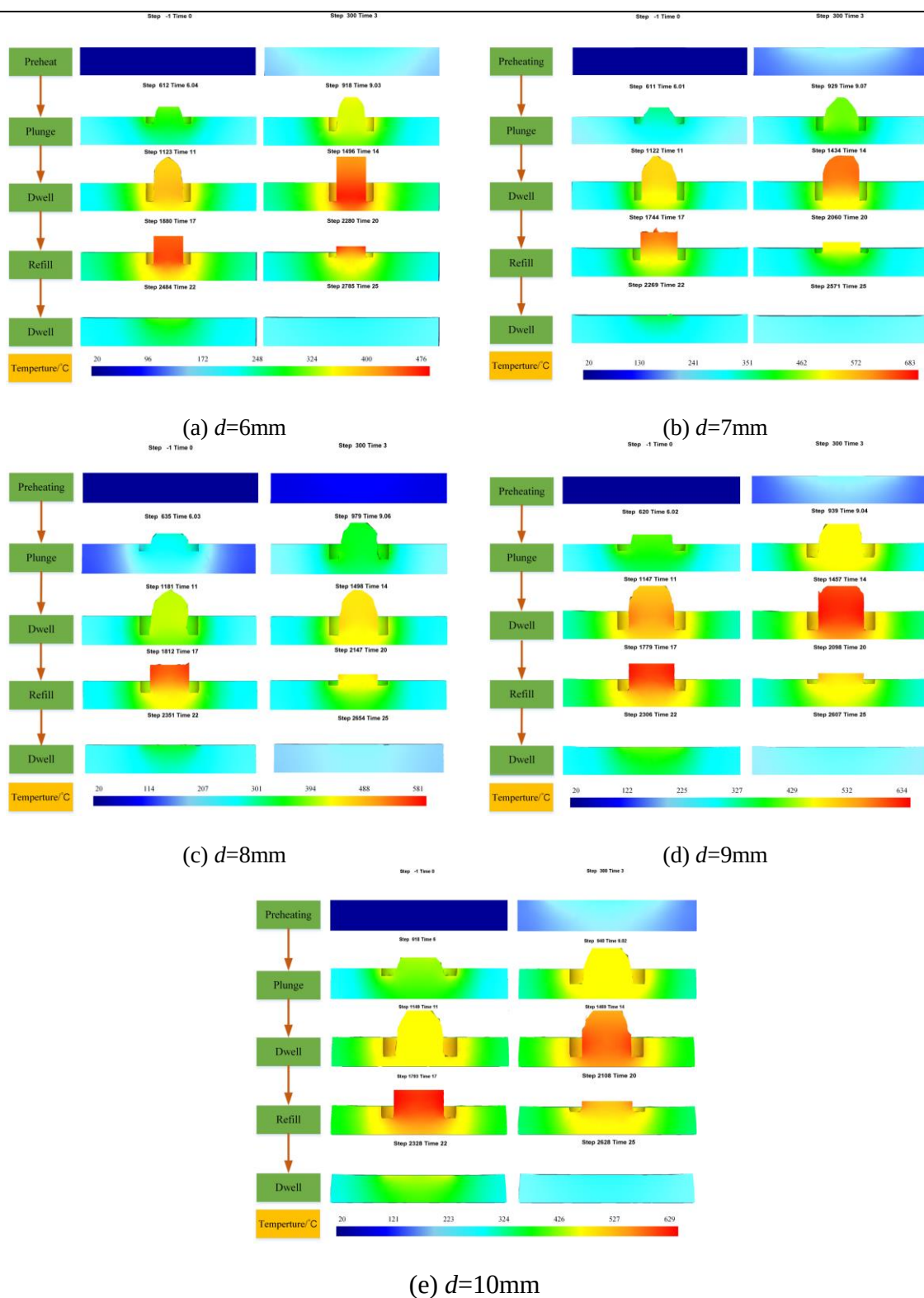


Рисунок 5.8 – Моделювання розподілу температурного поля

Рисунок 5.8 ілюструє вплив діаметра перемішувального інструмента на розподіл температурного поля. Зі збільшенням діаметра розширюється зона відпалу, а під час етапу витримки фіксується максимальна пікова температура.

При діаметрі інструмента 6 мм зона безпосередньо під місцем зварювання досягає температури відпалу вже на початку етапу заповнення. При діаметрі 7 мм температура відпалу досягається під час етапу витримки, охоплюючи ширину, більшу за діаметр зварної точки. Для інших діаметрів температура відпалу повністю досягається до завершення етапу занурення, при цьому ширина зони впливу значно перевищує діаметр зони перемішування зварного з'єднання.

Етап витримки має вирішальне значення для пластичного плинину металу, який заповнює порожнину, утворену перемішувальним стрижнем і гільзою, а діаметр інструмента також впливає на ступінь заповнення. Спочатку всі інструменти з різними діаметрами демонструють низький рівень заповнення, але зі збільшенням часу витримки ступінь заповнення для інструментів з меншим діаметром значно поліпшується, зокрема, інструмент діаметром 6 мм досягає повного заповнення. У цьому процесі температура в зоні точкового зварювання підвищується, і повне заповнення досягається на початку етапу дозаповнення.

Порожнина, утворена перемішувальним стрижнем і гільзою, заповнюється розплавленим металом під високою температурою і тиском, причому висока температура сприяє швидкому плинину металу в порожнину. Об'єм порожнини прямо пропорційний площі поперечного перерізу перемішувальної гільзи: зі збільшенням діаметра зростає і площа перерізу. Під час етапу занурення метал стискається, і товстіші стінки більших гільз впливають на швидкість заповнення металом. У результаті цього для інструментів з більшим діаметром неможливо досягти 100% заповнення на етапі витримки, тоді як інструменти з меншим діаметром забезпечують повне заповнення.

Рисунок 5.9 демонструє тенденції зміни фактичної температури та температури за результатами симуляційного аналізу в різних контрольних точках при використанні перемішувальних інструментів з різними діаметрами.

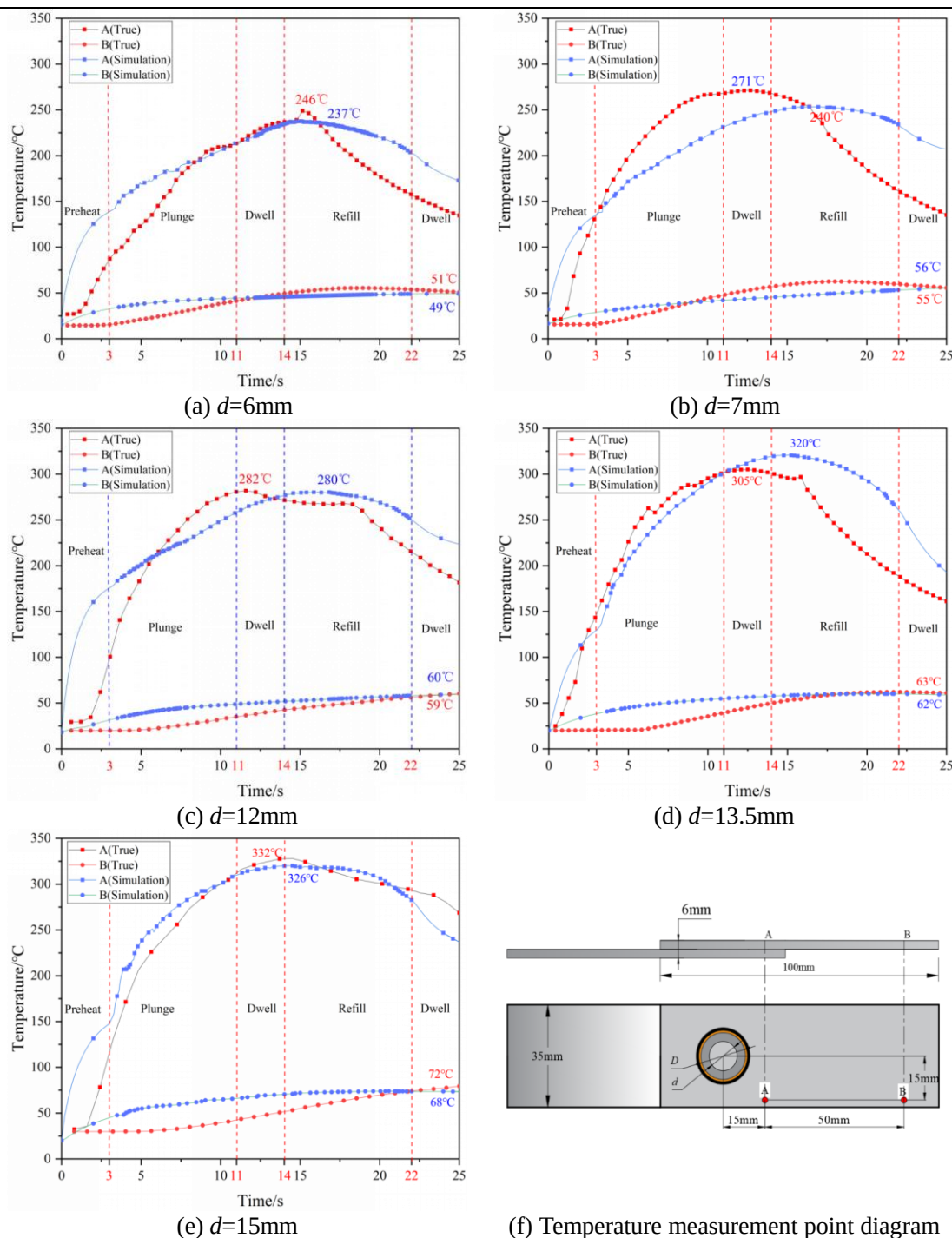


Рисунок 5.9 – Температурна динаміка в контрольних точках

Температура в точці А спочатку швидко зростає, після чого стабільно коливається, тоді як температура в точці В зростає поступово. Пікова температура в точці А досягається під час середнього етапу витримки, а в точці В - наприкінці етапу витримки. У симуляційному аналізі пікова температура в точці А з'являється дещо пізніше, з максимальною похибкою 12,5 % (при $d = 8$

мм); у точці В температура зростає швидше, з максимальною похибкою 5,9 % (при $d = 10$ мм).

У цілому, враховуючи сформовану поверхню та розподіл температур у контрольних точках за результатами симуляції, встановлені параметри моделювання в даному дослідженні є достовірними.

5.3.2 Математичний аналіз переміщення

Згідно з результатами, отриманими за допомогою моделі симуляційного аналізу, для глибшого розуміння реального переміщення та плину внутрішнього металу, які складно спостерігати безпосередньо в реальних умовах, була використана функція трасування частинок у модулі постобробки програмного забезпечення Deform. Для цього було обрано частинки у репрезентативних положеннях з метою відстеження їхнього переміщення в режимі реального часу. Конкретні положення та координати частинок у кожному з характерних місць наведено на рисунку 5.10.

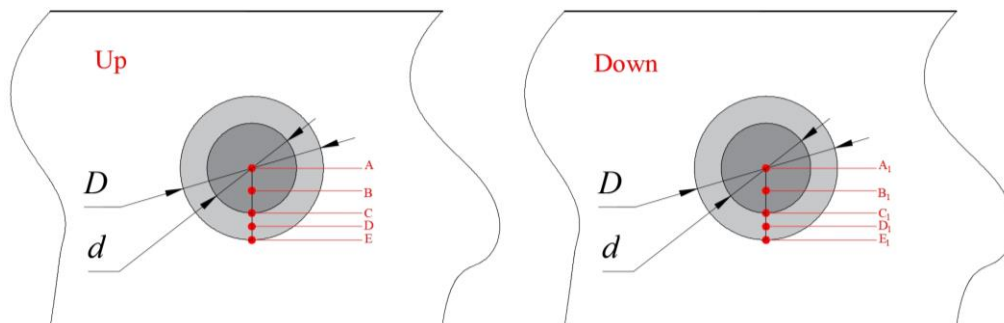


Рисунок 5.10 – Схематичне зображення розташування точок відбору для трасування частинок

На рисунку 5.10 показано 10 точок відбору (A–E, A1–E1), які відповідають одна одній уздовж товщини пластини. Точки A, B, C, D та E розташовані на 0,2 мм нижче нижньої поверхні верхньої пластини, тоді як точки A1–E1 знаходяться на верхній поверхні нижньої пластини. Точка A розташована в центрі зони точкового зварювання, точка C - на краю зони дії перемішувального стрижня, а точка E - на краю зони перемішувальної гільзи. Точки B і D розміщені відповідно посередині між A і C та між C і E.

Рисунок 5.11 демонструє динаміку зміни переміщень у різних точках відбору для різних діаметрів перемішувального інструмента. Через симетрію зварювання методом перезаповненого тертєвого перемішування були обрані напрями X і Z для відстеження переміщень: вісь X відповідає горизонтальному переміщенню, а вісь Z - вертикальному.

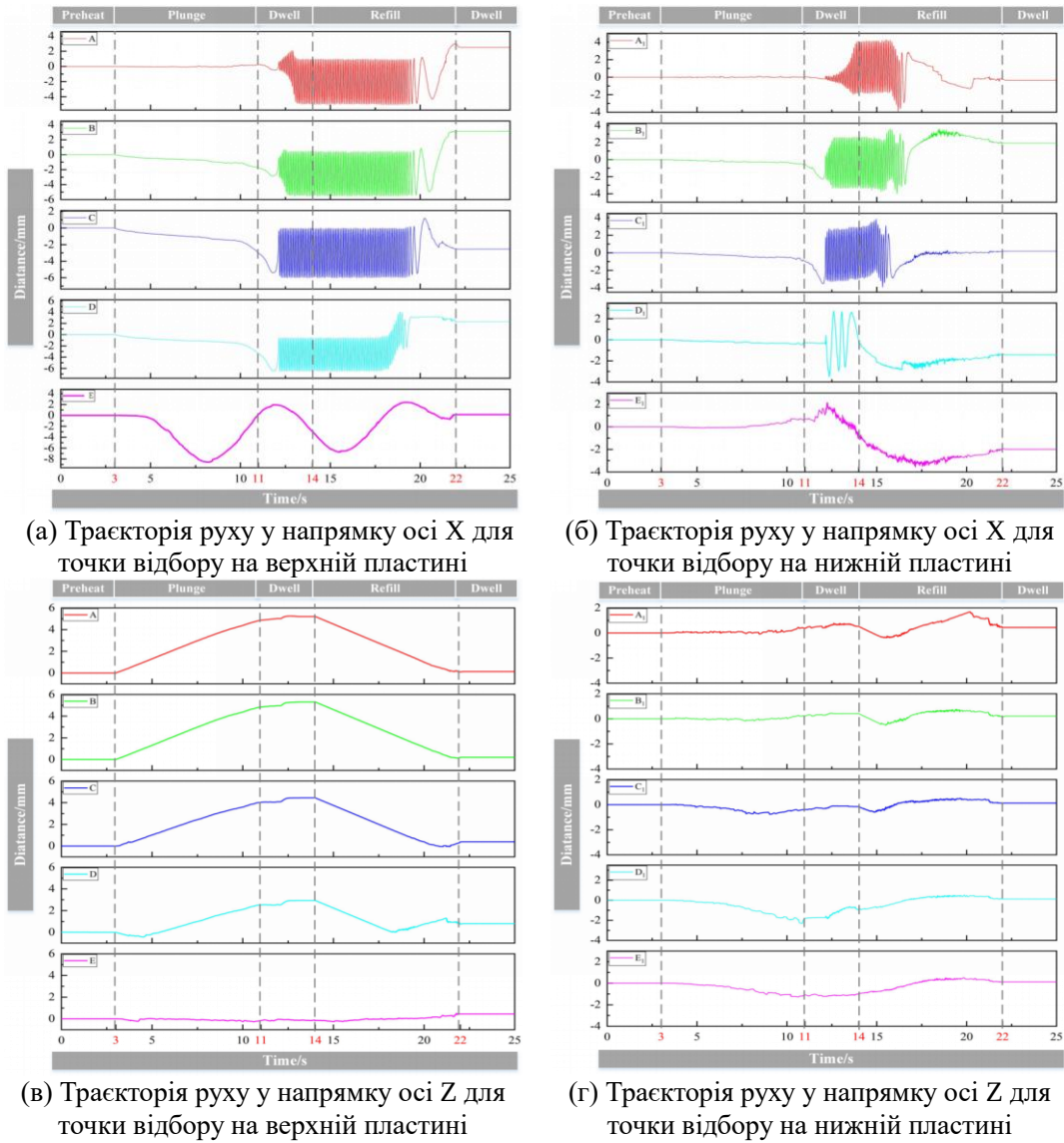


Рисунок 5.11 – Траєкторія руху точки відбору при d = 6 мм

Щодо амплітуди горизонтального переміщення, при діаметрі перемішувального стрижня 6 мм частота та амплітуда коливань точок А і В, розташованих під стрижнем, загалом збігаються – спостерігаються синусоїдальні коливання з амплітудами, близькими до діаметра самого стрижня. Точка відбору Е, що знаходиться на краю, має найбільшу амплітуду

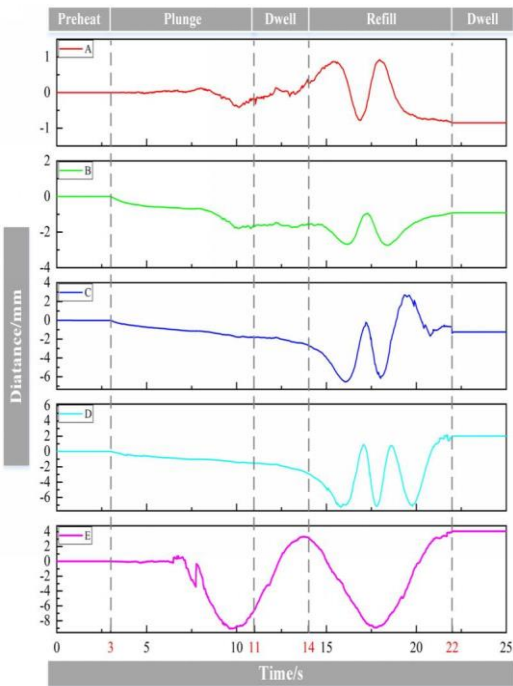
переміщення, однак її частота коливань суттєво нижча, ніж у інших точок. Для нижньої пластини амплітуда, частота і тривалість коливань значно менші порівняно з верхньою пластиною.

У вертикальному напрямку, зі збільшенням відстані від центру зони точкового зварювання амплітуда переміщення поступово зменшується, формуючи загальний профіль, подібний до «гірського» піку, з вищими значеннями в центрі і нижчими з боків. Максимальні значення переміщень для верхньої та нижньої пластин спостерігаються в точках А і А1 відповідно, що точно відповідають центру зварної зони. Амплітуда переміщення в точці А приблизно дорівнює осьовому переміщенню стрижня, тоді як у крайовій точці Е переміщення майже дорівнює нулю. Амплітуди коливань точок відбору на нижній пластині значно менші, ніж у відповідних точках верхньої пластини; найбільше зниження спостерігається в точці Е1, яка розташована на самому краю дії перемішувальної гільзи, де максимальне вертикальне переміщення приблизно відповідає глибині проникнення гільзи в нижню пластину.

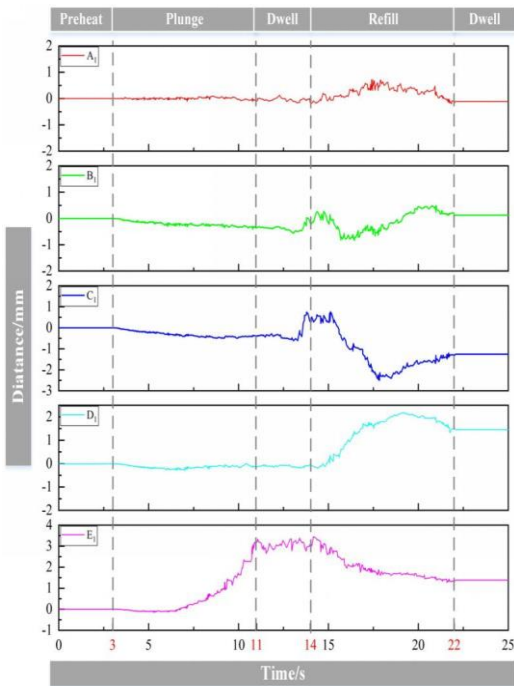
Коли діаметр перемішувального інструмента збільшується до 8 мм і 10 мм, тенденції зміни переміщень як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках залишаються дуже подібними до тих, що спостерігалися при діаметрі 7 мм. Проте частота циклічних коливань суттєво знижується, що особливо помітно у горизонтальних переміщеннях точки Е на верхній пластині, а також у точках відбору на нижній пластині, як показано на рисунках 5.12 та 5.13.

Для переміщення у вертикальному напрямку характерною відмінністю при використанні перемішувального інструмента з більшим діаметром є те, що точка відбору, розташована безпосередньо під перемішувальним стрижнем, демонструє чітко виражене пікоподібне переміщення, тоді як точка під перемішувальною гільзою – переміщення у формі вираженої впадини. Перехідною точкою між цим позитивним і негативним переміщенням є точка С1, яка знаходиться на межі між стрижнем і гільзою на нижній пластині. Така закономірність відповідає спостереженням і для інших діаметрів

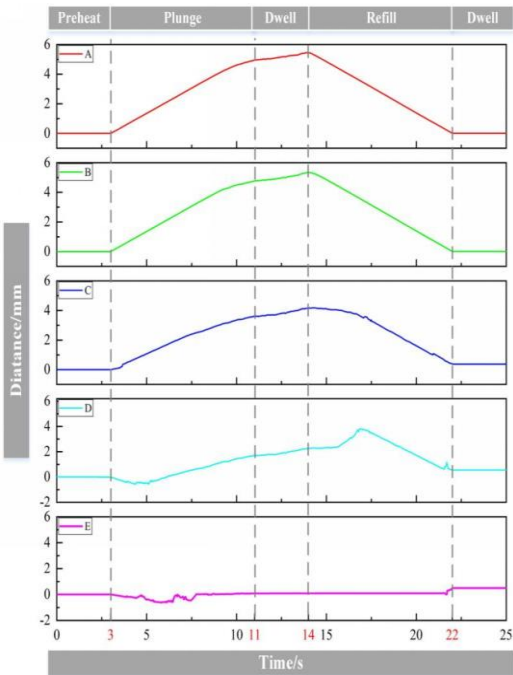
перемішувального інструмента.



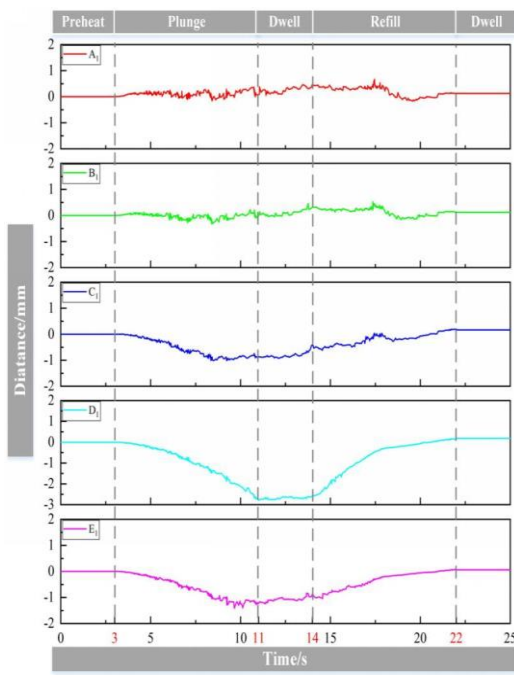
(а) Траєкторія руху у напрямку осі X для точки відбору на верхній пластині



(б) Траєкторія руху у напрямку осі X для точки відбору на нижній пластині

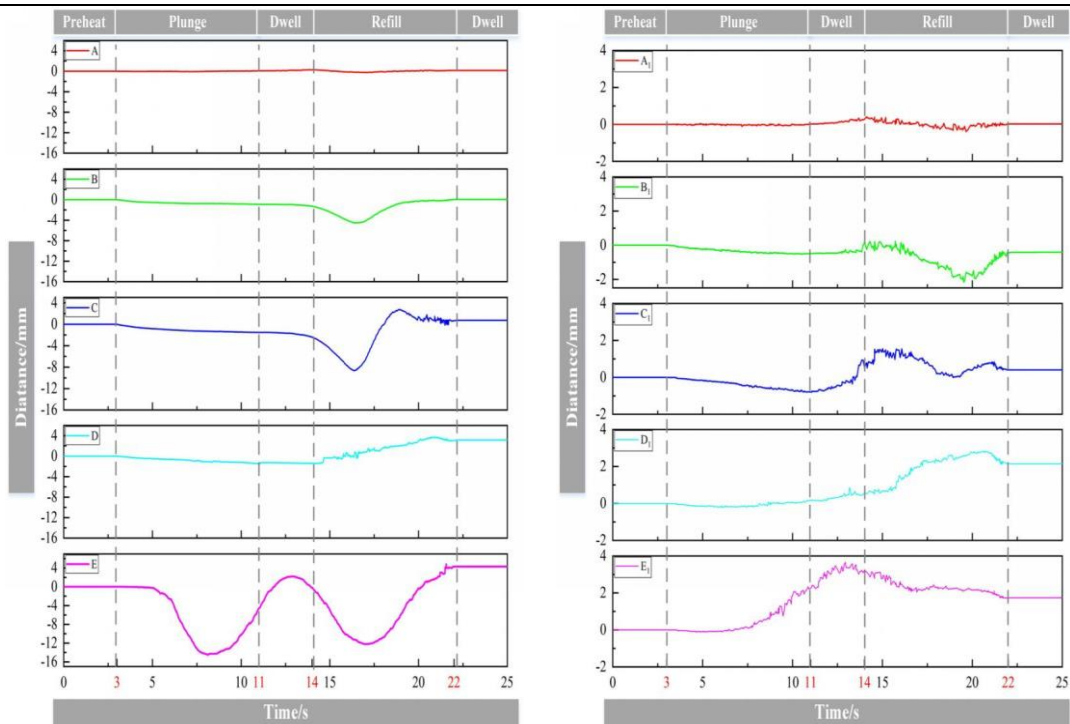


(с) Траєкторія руху у напрямку осі Z для точки відбору на верхній пластині



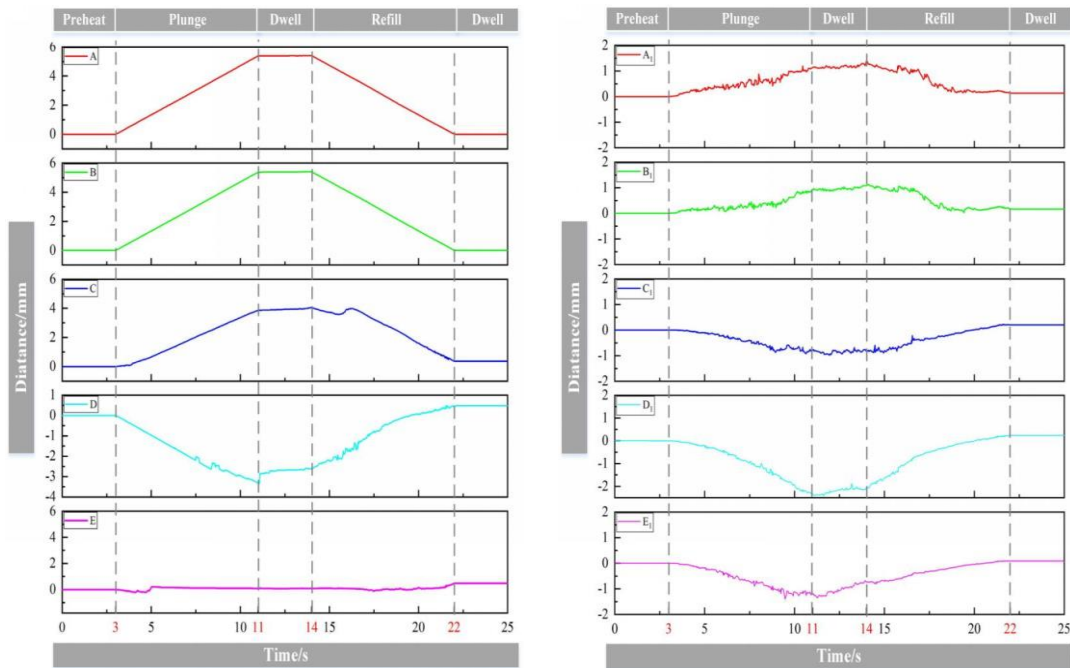
(д) Траєкторія руху у напрямку осі Z для точки відбору на нижній пластині

Рисунок 5.12 – Траєкторія руху точки відбору при $d = 8$ мм



(а) Траєкторія руху у напрямку осі X для точки відбору на верхній пластині

(б) Траєкторія руху у напрямку осі X для точки відбору на нижній пластині



(с) Траєкторія руху у напрямку осі Z для точки відбору на верхній пластині

(д) Траєкторія руху у напрямку осі Z для точки відбору на нижній пластині

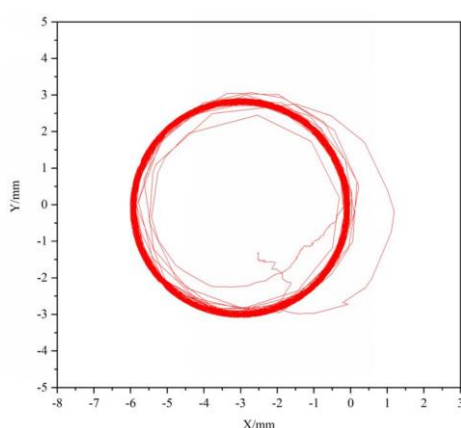
Рисунок 5.13 – Траєкторія руху точки відбору при d = 10 мм

Це свідчить про те, що зона з’єднання стрижня і гільзи є ключовою для пластичного плину металу, а розуміння форми цього плину має вирішальне

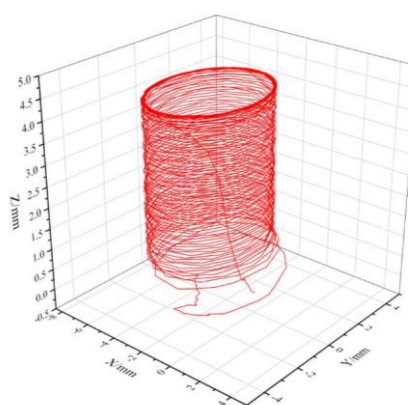
значення для пояснення процесу формування зварної зони при зварюванні тертям з перемішуванням із перезавповненням (ТЗТЗП).

Для кращого розуміння переміщення точки відбору С на рисунках 5.14 – 5.16 показано більш детальну просторову форму переміщення цієї точки. Як чітко видно з наведених рисунків, точка С утворює виражений спіральний потік у просторі. Це явище більш виражене і чітке, коли діаметр змішувального інструмента становить 6 мм: кількість спіральних витків є найбільшою та більш впорядкованою. Зі збільшенням діаметра змішувального інструмента кількість утворених у просторі спіральних витків поступово зменшується, а висота спіралі також зменшується.

Отже, точка відбору, розташована безпосередньо під змішувальним інструментом, демонструє горизонтальні коливання переміщення, які тісно нагадують синусоїдальну функцію. Коливання у точках відбору верхньої пластини мають велику амплітуду, відбуваються часто і тривають довго, але це явище зменшується зі збільшенням діаметра змішувального інструмента. Під час точкового зварювання метал верхньої пластини завжди безпосередньо контактує зі змішувальним інструментом, прилипаючи до нього при високих температурах і утворюючи регулярні коливання завдяки його високошвидкісному обертанню.

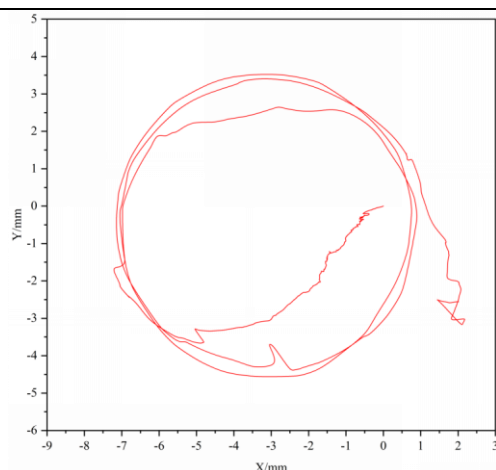


(а) Траєкторія у площині ХУ

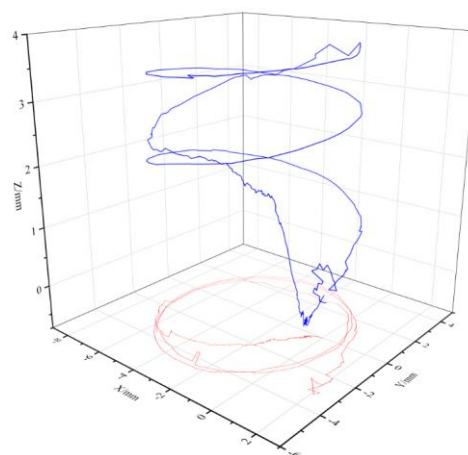


б) Траєкторія у просторі ХYZ

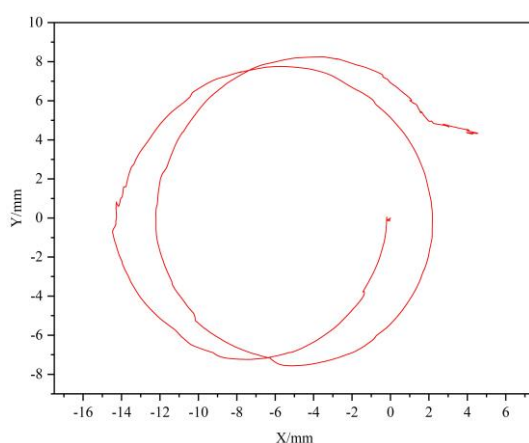
Рисунок 5.14 – Траєкторії точок відбору при $d = 6$ мм (Точка С)



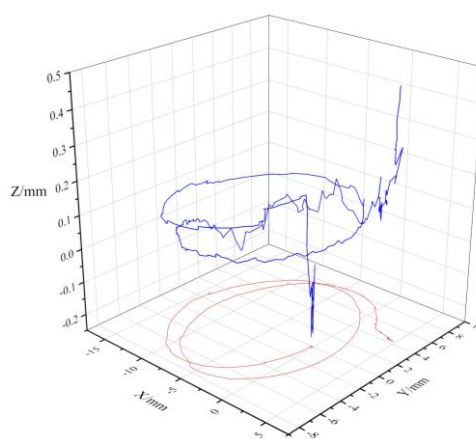
(a) Траєкторія у площині XY



(b) Траєкторія у просторі XYZ

Рисунок 5.15 – Траєкторії точок відбору при $d = 8$ мм (Точка С)

(a) Траєкторія у площині XY



(b) Траєкторія у просторі XYZ

Рисунок 5.16 – Траєкторії точок відбору при $d = 10$ мм (Точка С)

На відміну від цього, метал нижньої пластини контактує зі змішувальним інструментом лише під час фінальної стадії заглиблення, етапу витримки та початкової стадії витягання. Його коливання мають меншу амплітуду, відбуваються рідше і тривають коротше. Зі збільшенням діаметра інструмента ця різниця стає більш вираженою, оскільки точки відбору залишаються безпосередньо під інструментом, і для утворення повних коливань потрібне більше зусилля переміщення, тоді як сила зчеплення між інструментом і високотемпературним алюмінієвим сплавом є обмеженою і не може підтримувати повні коливання при зростанні діаметра.

У вертикальному напрямку при різних діаметрах змішувальних

інструментів закономірності переміщення точок відбору на верхній і нижній пластинах є в основному однаковими. Точки відбору безпосередньо під змішувальним стрижнем рухаються вгору, тоді як точки під змішувальною гільзою вниз, згодом повертаючись у початкове положення наприкінці стадії зворотного заповнення. Амплітуда переміщення точок відбору нижньої пластини значно менша, ніж у верхньої. Максимальна амплітуда переміщення точок відбору верхньої пластини приблизно дорівнює переміщенню змішувального стрижня, тоді як амплітуда переміщення точок нижньої пластини трохи менша за глибину проникнення змішувальної гільзи в нижню пластину.

Точки відбору С та С1 розташовані на межі між змішувальною гільзою та стрижнем, і їх переміщення є досить специфічним, особливо у вертикальному напрямку. Під час стадії заглиблення ці дві точки рухаються вгору, а під час стадії зворотного заповнення вниз. У фазі заглиблення змішувальний стрижень рухається вгору, а змішувальна гільза вниз, утворюючи порожнину, яка швидко заповнюється високотемпературним металом. Протилежне спостерігається на стадії зворотного заповнення. Це підтверджує вертикальний характер переміщення точок С та С1, доводячи точність моделі симуляції.

5.4 Висновки до розділу

У цьому розділі на основі експериментальних даних, отриманих у попередніх розділах, було виконано математичний аналіз ТЗТЗП за допомогою програмного забезпечення Deform, вибрано репрезентативні параметри процесу як основні об'єкти дослідження, і в результаті отримано температурне поле та внутрішнє переміщення металу в зоні точкового зварювання:

1. Побудовано математичну модель рефілінгового точкового зварювання методом тертя з перемішуванням (ТЗТЗП) з використанням різних змішувальних інструментів у програмі DeformV11.0. Отримано важливу інформацію про напружене поле, температурне поле, поле швидкостей,

відстеження частинок і деформацію сітки на різних стадіях зварювання. Результати симуляції добре узгоджуються з зовнішніми характеристиками та температурним полем реальної зони зварювання.

2. Математичні симуляції показали, що збільшення діаметра змішувального інструмента суттєво впливає на температурне поле в зоні точкового зварювання: пікові температури перевищують температуру відпалу алюмінієвого сплаву 6061-T6 (350 °C) і зростають із збільшенням діаметра. Порівняння з фактичними вимірюваннями температури показало незначні відмінності у часі досягнення пікових значень, при цьому максимальна похибка становила 12,5 % для $d = 8$ мм та 5,9 % для $d = 10$ мм. Чим більший діаметр інструмента, тим довший і ширший час відпалу у зоні зварювання.

3. Стадія витримки є вирішальною для пластичного плину металу, що заповнює порожнину змішувального інструмента. Діаметр інструмента та час витримки впливають на ступінь заповнення. Інструменти з меншим діаметром ($d < 6$ мм) забезпечують кращий ефект заповнення, але не досягають 100 %. Під час витримки температура у зоні зварювання досягає максимуму, а під час стадії зворотного заповнення змішувальний стрижень стискає метал, повністю заповнюючи порожнину.

4. Результати моделювання показали, що для інструментів з меншим діаметром просторові гвинтоподібні траєкторії є більш вираженими та слабшають зі збільшенням відстані від центру зварного шва; амплітуда синусоїдальних коливань на площині шва зменшується, період збільшується, а вертикальне переміщення знижується. Із зростанням діаметра кількість витків спіральної траєкторії зменшується, положення синусоїдальних коливань зміщується далі від центру, а вертикальне переміщення суттєво не змінюється. Амплітуда коливань точок нижньої пластини відносно низька, демонструючи аналогічну тенденцію. Ця траєкторія руху дуже схожа на траєкторію руху змішувального інструмента.

5. Математичні симуляції показали, що інструменти з малим діаметром здатні обертати всю зону металу у зоні зварювання тертям з

перемішуванням як єдине ціле та переміщувати її в осьовому напрямку, при цьому зони максимальних напружень і деформацій розташовані на дні змішувальної гільзи. Інструменти з великим діаметром викликають лише зсув і осьове обертання прилеглих ділянок металу, тоді як віддаленіші ділянки переміщуються лише в осьовому напрямку.

РОЗДІЛ 6 АНАЛІЗ МЕХАНІЗМУ ФОРМУВАННЯ ТЗТЗП

6.1 Вступ

Експериментальні результати свідчать, що різні змішувальні інструменти істотно впливають на продуктивність та внутрішній плин металу, що безпосередньо позначається на процесі формування зварного з'єднання. Напрямок плину металу змінюється на різних стадіях точкового зварювання, що підкреслює складність формування зони ТЗТЗП. Подальші дослідження механізму формування зони ТЗТЗП можуть поглибити розуміння внутрішнього плину металу та впливу діаметра змішувального інструмента на якість точкового зварювання. Це є ключем до розкриття специфіки процесу та форми ефективного з'єднання у точково зварених пластинах.

Для кращого розуміння механізму формування зони ТЗТЗП у цьому розділі переважно застосовується метод миттєвої зупинки для аналізу плину металу в зоні точкового зварювання. Також інтегрується модель симуляційного аналізу з попереднього розділу для пояснення механізму формування зони ТЗТЗП.

6.2 Механізм формування ТЗТЗП

6.2.1 Процес формування ТЗТЗП при $d = 6$ мм

З попередніх розділів відомо, що весь процес ТЗТЗП поділяється на п'ять стадій:

- стадія попереднього нагрівання,
- стадія заглиблення,
- стадія витримки,
- стадія зворотного заповнення,
- стадія стабілізації.

На стадіях заглиблення, витримки та зворотного заповнення змішувальний інструмент обертається з високою швидкістю, проникаючи всередину металу зварюваної зони. Крім того, на стадіях заглиблення та

зворотного заповнення відбувається також осьовий рух інструмента. Ці три стадії безпосередньо впливають на плин металу всередині зони точкового зварювання та є ключовими для забезпечення розм'якшення металу й деформації металу при високих температурах.

На рисунку 6.1 показано морфологію зони зварного шва, коли діаметр змішувального інструмента становить 6 мм, а глибина проникнення 2 мм. На цьому етапі порожнина, утворена внаслідок руху стрижня вгору та занурення гільзи вниз, повністю заповнюється високотемпературним металом.

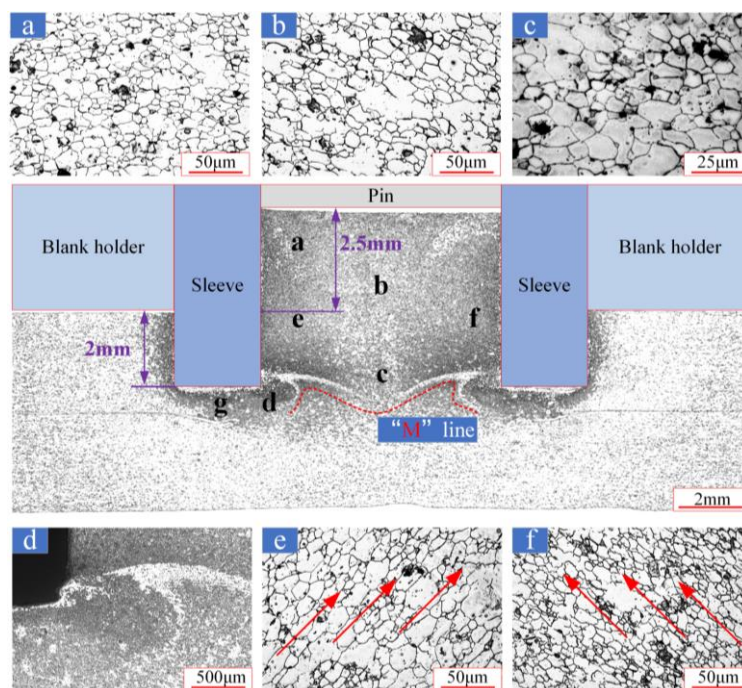


Рисунок 6.1 – Морфологія зони точкового зварювання на стадії заглиблення
($d = 6 \text{ мм}$)

Зона зварного шва має «якореподібну» форму з центральним вертикальним підвищенням і вигнутими догори боковими частинами. Метал безпосередньо під змішувальним стрижнем зазнає інтенсивного перемішування та екструзії, що призводить до значного подрібнення зерен. У точці а (поблизу краю гільзи) спостерігається найсильніший зсувний ефект, тоді як у точці б (у центрі) перемішування слабше, проте зерна все одно залишаються подрібненими. Це свідчить про те, що вся ділянка під змішувальним стрижнем зазнає значної пластичної деформації.

На тому ж горизонтальному рівні, що й глибина занурення гільзи, у зоні перемішування спостерігається виразна яскрава лінія у формі «М». Ця лінія відображає слід межі металу, який зазнав інтенсивної пластичної деформації.

Можна зробити висновок, що метал безпосередньо під стрижнем зазнав обертального руху в порожнині під дією зсувних сил, що виникали на внутрішній поверхні змішувального інструмента. На відміну від цього, нижня ділянка, де тепловий вплив і безпосередній контакт з інструментом були недостатніми, не зазнала такого обертання. У результаті сформувався пограничний шар обертального руху, який позначається «М»-подібною лінією.

Аналогічно, результати симуляції, наведені на рисунку 6.2, також підтверджують це явище. Значна кількість металу переміщується з-під гільзи у напрямку до нижньої частини стрижня, створюючи максимальну швидкість деформації на внутрішньому нижньому краї гільзи, що показано на рисунках 6.2 (c) і (d).

Така тенденція плинущі призводить до утворення області з низькою швидкістю потоку та низьким тиском у центрі, тоді як бокові ділянки характеризуються вищою швидкістю потоку, підвищеною температурою і більшим тиском. У результаті формується «М»-подібна межева лінія, що узгоджується з характером плинущі металу, проілюстрованим на рисунку 6.2 (b).

Коли змішувальний інструмент занурюється у верхню пластину, він ще не досяг межі між верхньою та нижньою пластинами. Однак вже можна спостерігати, що роздільна лінія безпосередньо під змішувальним стрижнем зникла, тобто часткове з'єднання вже відбулося, як показано на рисунку 6.3.

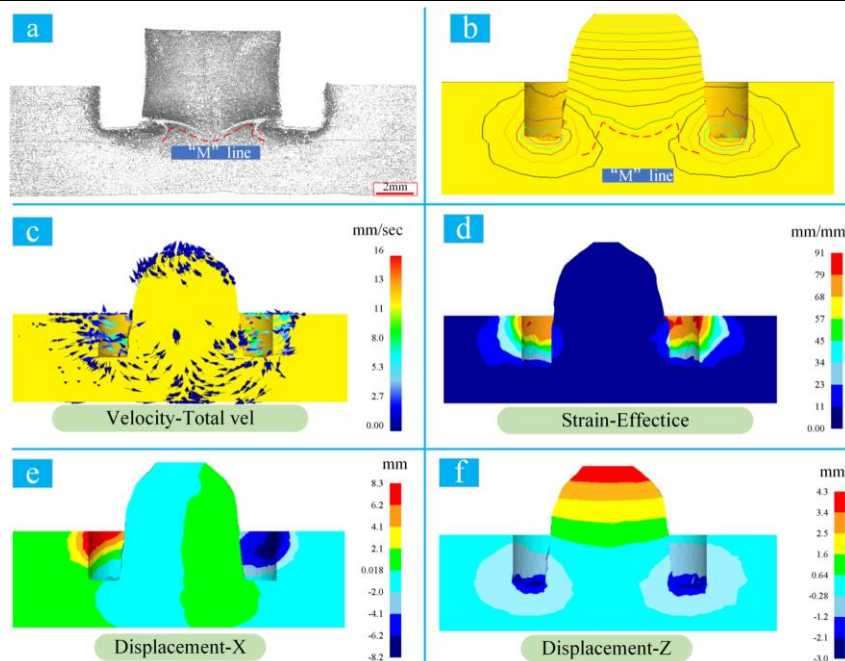


Рисунок 6.2 – Результати симуляції стадії заглиблення верхньої пластини ($d = 6 \text{ мм}$)

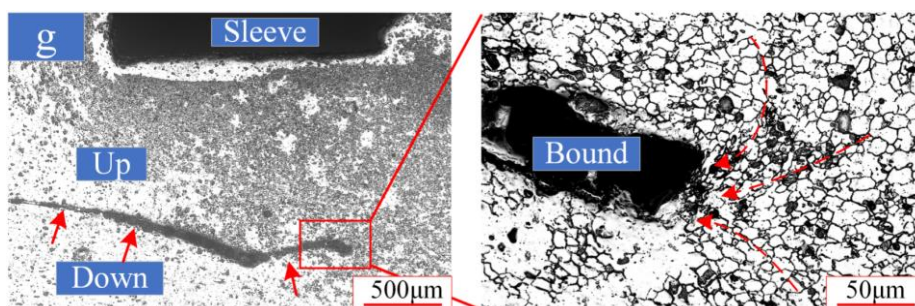


Рисунок 6.3 – Зазор між верхньою та нижньою пластинами ($d = 6 \text{ мм}$)

У міру просування процесу ТЗТЗП змішувальна гільза поступово занурюється у внутрішню частину нижньої пластини. Форма «якореподібної» зони точкового зварювання суттєво не змінюється, проте зерна в точці А (на внутрішньому краї змішувальної гільзи) та в точці В (у центрі зони зварювання) стають більш подрібненими, що показано на рисунках (а) та (б) рисунка 6.4.

Точка С у верхньому лівому куті безпосередньо піддається впливу як змішувального стрижня, так і змішувальної гільзи, і ступінь подрібнення зерен у цій точці вищий, ніж у точках А і В, що проілюстровано на рисунку 6.4 (с). Це підтверджує, що безпосередній контакт зі змішувальним інструментом

створює сильний зсувний ефект, який сприяє подрібненню зерен.

Зі збільшенням глибини заглиблення та підвищенням загальної температури формується нова «М»-подібна лінія, форма якої змінюється, стаючи схожою на контур окулярів, і в роботі вона названа «лінією окулярів». Вище цієї «лінії окулярів» з'являється ще одна нова «М»-подібна лінія, як показано на рисунку 6.4.

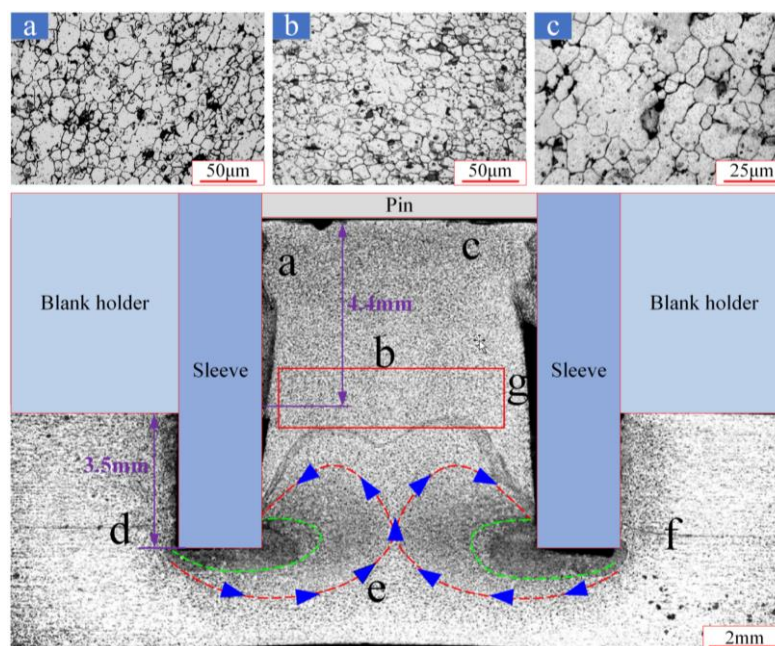


Рисунок 6.4 – Морфологія на стадії заглиблення у нижню пластину ($d = 6$ мм)

Наявність «лінії у формі окулярів» також спостерігається у результатах симуляції, що показано на рисунку 6.5. На карті контурів переміщення (рисунок 6.5 (b)) ця лінія чітко проглядається. Карта контурів тиску (рисунок 6.5 (c)) показує, що найвищий тиск виникає всередині цієї області. Карта контурів швидкості (рисунок 6.5 (d)) демонструє протилежні напрями швидкості з обох боків центральної осі зони зварювання, що додатково підтверджує наявність загального обертального руху всередині зварного з'єднання. Позитивні та негативні значення вказують на напрямки плинину.

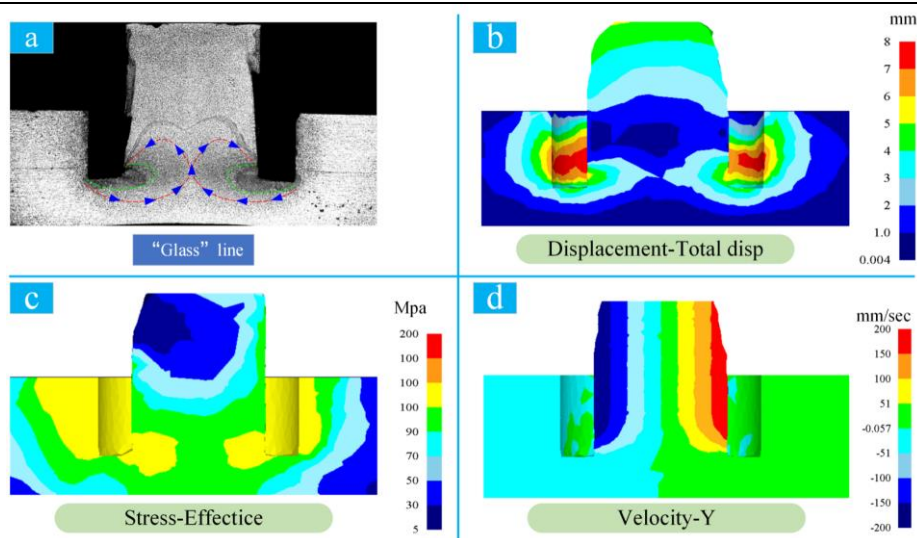


Рисунок 6.5 – Результати симуляції стадії заглиблення ($d = 6$ мм)

«М»-подібна лінія фактично є залишковою лінією з'єднання (Joint Residual Line, ЗЛЗ), яка поступово піднімається в міру того, як порожнина під стрижнем зміщується вгору під час заглиблення інструмента. Механізм її формування подібний до того, що спостерігається на початковій стадії занурення.

Через наявність оксидної плівки з високою температурою плавлення на поверхні листа, під час металографічного травлення можуть утворюватися корозійні ямки, які під мікроскопом виглядають як чорні лінії. На цій стадії ЗЛЗ виглядає більш плоскою в центрі, з помітними шаруватими структурами та чітким спіральним слідом у центральному заглибленні, що свідчить про гвинтоподібний висхідний рух металу на межі під час заглиблення. Навколишні зерна також зазнають значного подрібнення (рис. 6.6).

Це спостереження добре узгоджується з результатами симуляції траєкторії частинок, що додатково підтверджує точність моделі [101].

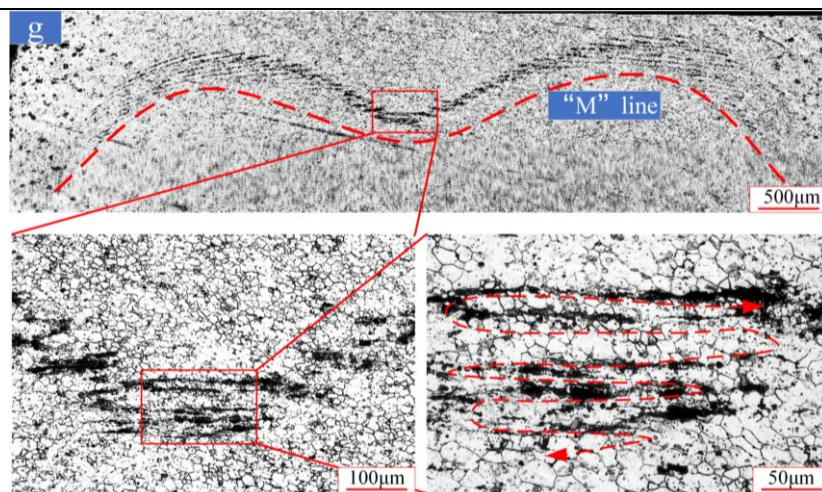


Рисунок 6.6 – Лінія «М» на стадії заглиблення в нижню пластину
($d = 6 \text{ мм}$)

Коли стадія заглиблення завершується і починається стадія витримки, змішувальний інструмент обертається з високою швидкістю без осьового переміщення. У цей час ступінь подрібнення зерен поблизу змішувального інструмента суттєво не змінюється порівняно зі стадією заглиблення (див. рисунки 6.7(a) та (b)), однак зерна в точці С, що розташована в центрі зони зварювання, подрібнюються ще більше. Це пояснюється відносно низьким тиском у центрі зварного з'єднання, через що навколишній метал чинить більший стискальний вплив на центральну ділянку, сприяючи подальшому подрібненню та фрагментації зерен.

Межа між верхнім і нижнім листами змінюється з ЗЛЗ у параболічну форму, що свідчить про те, що метал поблизу гільзи не зазнає значного осьового переміщення, тоді як центральний метал продовжує підніматися під дією тиску. У результаті центр ЗЛЗ поступово піднімається і перетворюється на параболу. У центральній частині параболи видно чіткі спіральні сліди, а зерна з обох боків явно вигинаються до центру, орієнтуючись за дотичною до параболи, що пояснює механізм її формування.

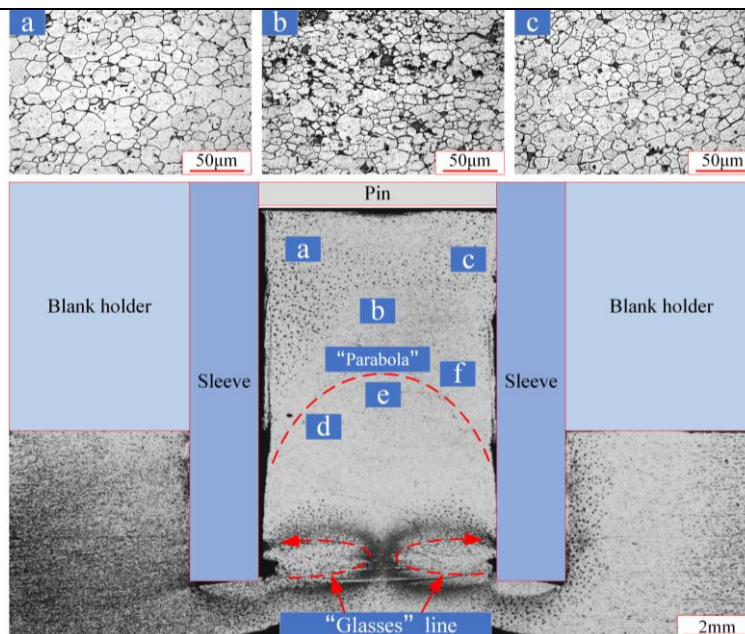


Рисунок 6.7 – Морфологія зони точкового зварювання на стадії витримки ($d = 6 \text{ мм}$)

На відміну від цього, через відсутність осьового руху змішувального інструмента морфологія «лінії у формі окулярів», що утворилася під час стадії заглиблення, майже не змінюється і має меншу зону поширення, що відображає зменшення припливу металу, як показано на рисунку 6.7.

Для межевої лінії між верхньою та нижньою пластинами, що має параболічну форму, у симуляції було відстежено дискретні частинки, розташовані на цій межі. Результати наведені на рисунку 6.8. У моделі симуляції дискретні частинки на межі формують параболу як у площинах X , так і Y , а в площині Z вони демонструють обертальну хвилю, подібну до руху змішувального інструмента, обертаючись приблизно зі швидкістю 600 об/хв, що повільніше за швидкість обертання самого інструмента. Це свідчить, що хоча зона точкового зварювання може обертатися як єдине ціле, у ній зберігається відносно зсувне ковзання відносно змішувального інструмента.

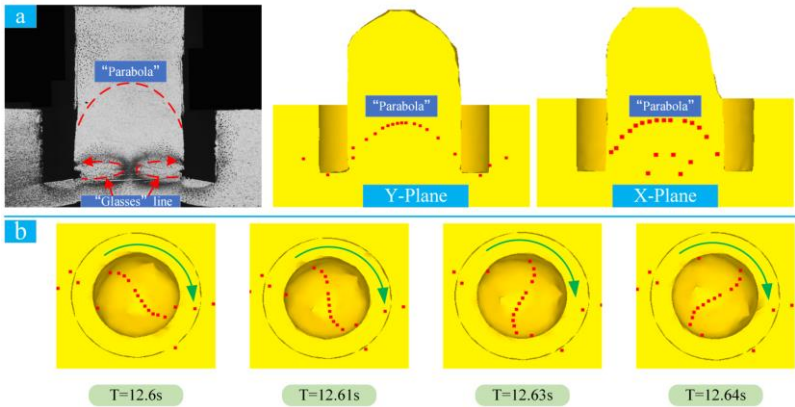


Рисунок 6.8 – Результати відстеження точок у симуляції на стадії витримки (d = 6 мм)

Рисунок 6.9 додатково ілюструє умови напруження, деформацій і переміщення на цій стадії. Карта переміщення показує якореподібний характер у нижній частині та параболічну форму поблизу змішувального стрижня, що узгоджується з металографічною структурою та результатами відстеження частинок. Карти напружень, деформацій і швидкостей на цій стадії не мають суттєвих відмінностей від стадії занурення, тому детально тут не наводяться.

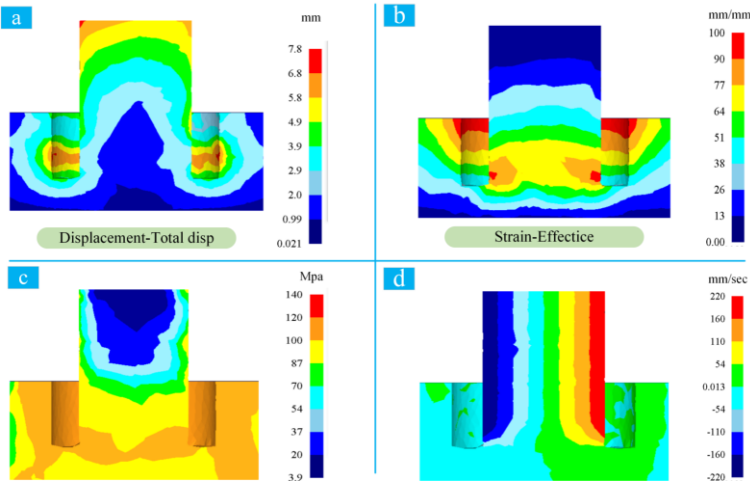


Рисунок 6.9 – Результати симуляції стадії витримки (d = 6 мм)

З завершенням стадії стабілізації та переходом до стадії зворотного заповнення, оскільки змішувальний інструмент під час попередньої стадії вже занурився у нижню пластину, етап зворотного заповнення починається саме з заповнення нижньої пластини. Її характерна мікроструктурна морфологія наведена на рисунку 6.10.

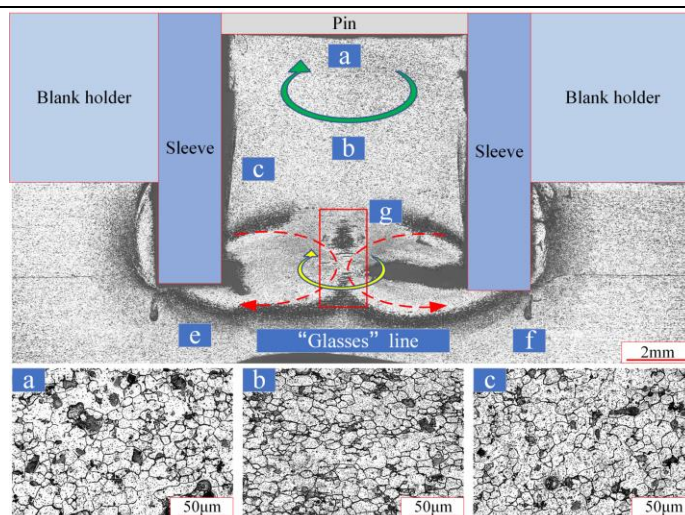


Рисунок 6.10 – Морфологія зони точкового зварювання на стадії зворотного заповнення ($d = 6 \text{ mm}$)

Видно, що загальна морфологія на цій стадії знову наближається до «якореподібної» форми, а розмір зерен у різних точках зони перемішування практично не зазнає помітних змін, оскільки структура вже була повністю подрібнена. Безпосередньо під змішувальною гільзою з'являється так звана «краплеподібна зона», про яку згадувалося в попередньому розділі.

Морфологія «лінії у формі окулярів» на цій стадії суттєво не змінилася, однак у центрі формується більш виразна спіральна траєкторія, яка є більшою за ту, що утворювалася на стадії заглиблення. Ця спіральна траєкторія проходить через центр усієї «лінії окулярів», що добре видно на рисунку 6.11.

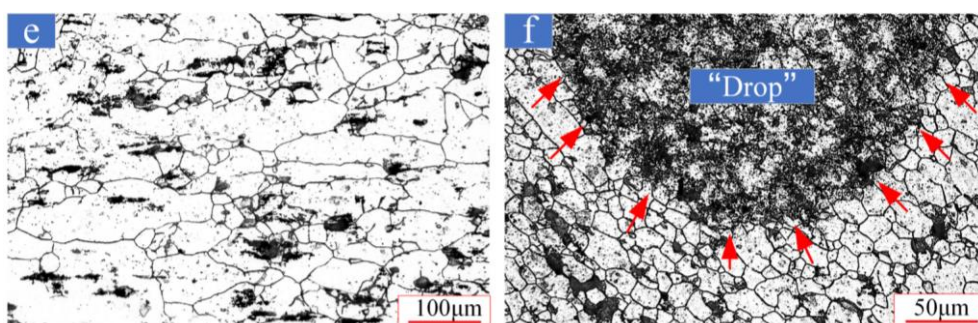


Рисунок 6.11 – Морфологія зони точкового зварювання на стадії зворотного заповнення (точки відбору: точки е та ф на рисунку 6.10)

На цій стадії метал безпосередньо стискається змішувальним інструментом, що створює більший тиск і зсувне навантаження, унаслідок чого

формується спіральна траєкторія з меншим кроком. Метал, розташований ближче до нижньої частини, має нижчий ступінь пластичності та важче піддається безпосередньому впливу, що призводить до утворення «трикутної» спіральної траєкторії, яка звужується у верхній частині та розширюється донизу, як показано на рисунку 6.12.

Додаткові підтвердження цього явища отримані з результатів симуляційного аналізу, наведених на рисунку 6.13.

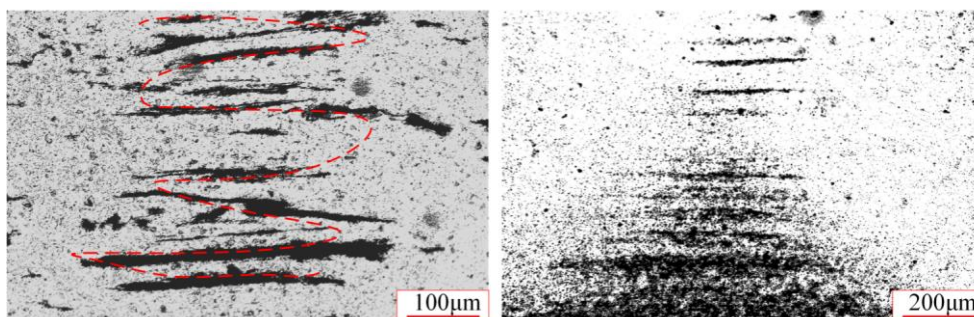


Рисунок 6.12 – Морфологія «лінії окулярів» на стадії зворотного заповнення

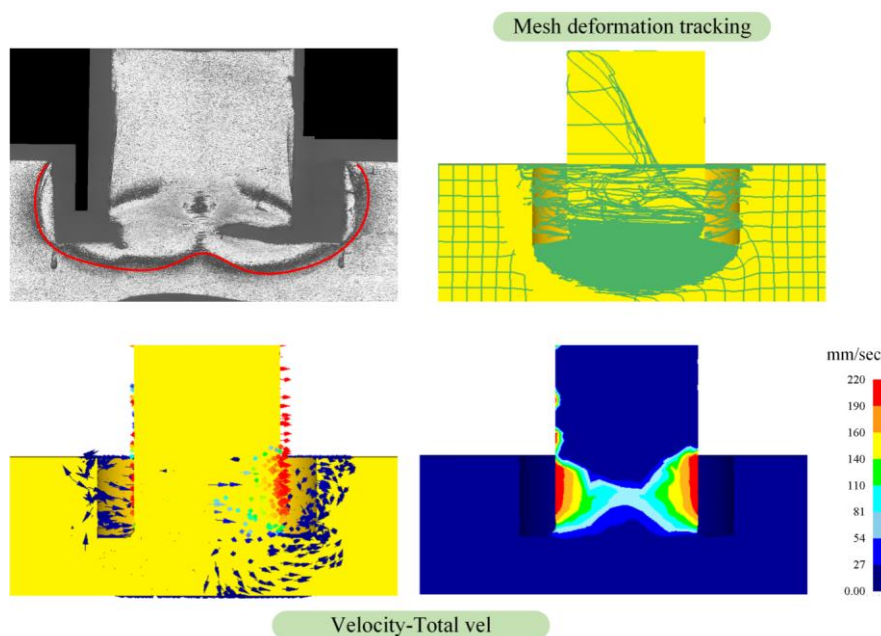


Рисунок 6.13 – Результати симуляції стадії зворотного заповнення та заглиблення нижньої пластини

Коли зворотне заповнення відбувається у верхній пластині, можна бачити, що «лінія окулярів» все ще зберігається, а роздільна лінія між верхньою та нижньою пластинами повністю зникає у зоні точкового зварювання. Розподіл зерен у кожній ділянці зони перемішування практично

ідентичний до того, який спостерігається після повного формування зварного з'єднання, що показано на рисунку 6.14.

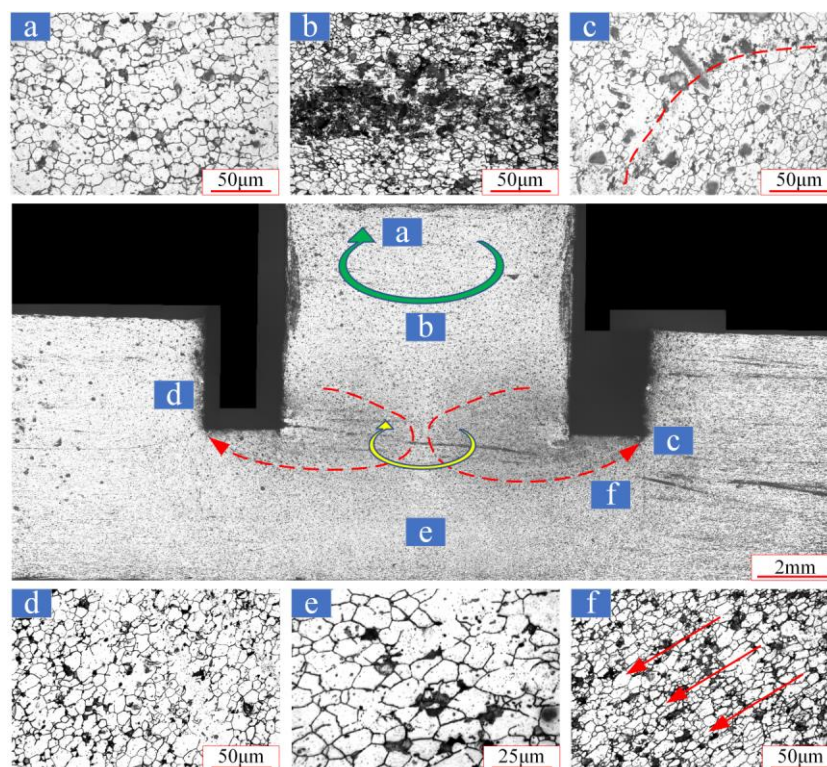


Рисунок 6.14 – Морфологія зони точкового зварювання на стадії зворотного заповнення ($d = 6$ мм)

Для кращого пояснення процесу формування зони зварювання на рисунку 6.15 показано взаємодію між внутрішнім змішувальним інструментом та металом у зоні точкового зварювання. Аналіз показує, що на дні змішувального інструмента формується виражена локальна зона зсувного обертання, яка в металографічних мікроструктурах проявляється як «зона окулярів».

Положення цієї зони змінюється відповідно до руху змішувальної гільзи, оскільки високошвидкісне обертання внутрішнього металу, спричинене гільзою, створює відносний обертальний зсув із нерухомим металом. Водночас ця зона є необхідним шляхом для проникнення металу всередину змішувального інструмента, що забезпечує формування локальної зони зсувного обертання. Дві «зони окулярів» з обох боків обертаються у протилежних напрямках.

Існує площа максимального зсуву, яка охоплює всю зону перемішування зварного шва. Висота H і ширина W «зони окулярів» безперервно змінюються, при цьому ширина W поступово збільшується, поки не охопить всю зону перемішування. Межова лінія між верхньою та нижньою пластинами поступово входить у зону зсувного обертання, зазнаючи інтенсивної пластичної деформації, зсуву, руйнування і повторної організації, утворюючи спіральну форму, що показано синьою штриховою лінією на рисунку.

Центральна межова лінія не повністю руйнується, тобто лінія ЗЛЗ, яка існує в зоні точкового зварювання. Це пояснюється тим, що вона спочатку зазнає підйомної деформації і піднімається вище площини максимального зсуву ще до того, як ширина W «зони окулярів» досягає свого максимуму, отже, вона не потрапляє в зону зсувного обертання. Це позначено синьою суцільною лінією в центрі рисунка.

Отже, тривалість існування і розміри локальної зони зсувного обертання безпосередньо впливають на процес формування зони точкового зварювання.

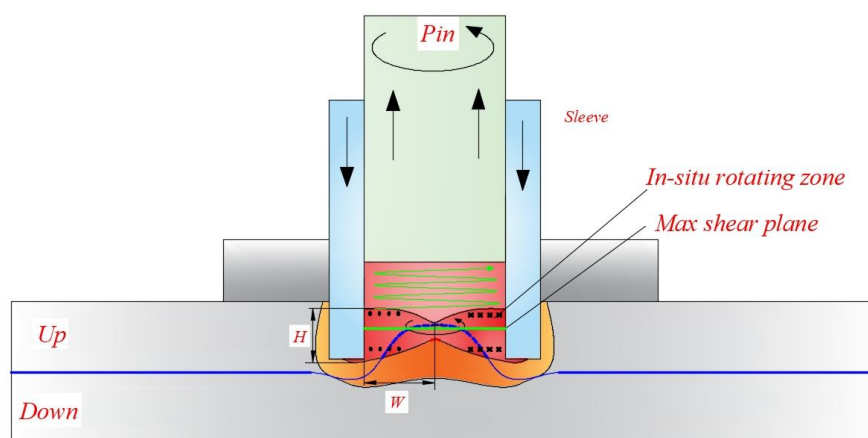


Рисунок 6.15 – Схематична діаграма зсуву металу під час стадії заглиблення ($d = 6$ мм)

Як видно з рисунка 6.16, лінія ЗЛЗ всередині зони точкового зварювання поступово розширюється зі збільшенням швидкості зварювання. Це означає, що триваліший процес точкового зварювання ефективніше усуває лінію ЗЛЗ, забезпечуючи більш інтенсивне перемішування зони зварювання. Таке

спостереження повністю узгоджується з тим, що час існування та розміри зони локального зсувного обертання безпосередньо впливають на ширину ЗЛЗ, що також підтверджує достовірність існування цієї зони [105–106].

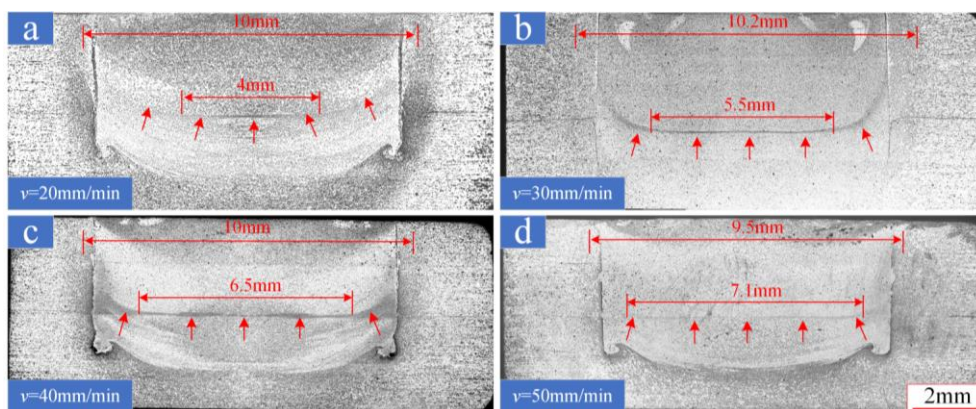


Рисунок 6.16 – Макроструктура точкових зварних з'єднань при різних швидкостях зварювання ($d = 6$ мм)

Таким чином, можна зробити висновок, що при діаметрі змішувального інструмента 6 мм пластичний плин металу в зоні ТЗТЗП протягом усієї стадії заглиблення відбувається переважно у формі спірального всмоктування та когезії і продовжується на стадії витримки. Завдяки сильному зсувному зчепленню між змішувальним інструментом і розм'якшеним при високій температурі металом відбувається виражений загальний обертальний рух.

Під час стадії зворотного заповнення метал під інструментом поступово стискається значним екструзійним зусиллям, тому на цій стадії метал набуває форми спірального стиснення і розширення. У міру просування процесу точкового зварювання, до моменту повного виходу інструмента із зони шва, заповнення зварної точки завершується у формі накопичувального інжекційного ущільнення. Це підтверджується як спіральними лініями, що спостерігаються в металографічній структурі зварної зони на різних стадіях, так і просторовим переміщенням відстежуваних частинок у результатах симуляції.

Отже, механізм формування при цьому діаметрі інструмента можна описати моделлю спірального всмоктувально-інжекційного накопичення. З аналізу видно, що роздільна лінія між верхньою та нижньою пластинами

з'єднується вже на стадії заглиблення завдяки достатньому зсувному зчепленню між інструментом і пластичним металом, яке забезпечує обертання всієї зони зварювання, створює достатню температуру і завершує ефективне з'єднання між пластинами під дією великого тиску. Подальший процес зварювання реалізує з'єднання у більшій області, а форма руху пластичного металу у зоні зварювання за цього діаметра інструмента може бути охарактеризована як зсувне тертя - локальне обертання.

Остаточно сформований зварний шов між верхньою та нижньою пластинами завершується у вигляді «повного тертєвого заклепкового з'єднання».

6.2.2 Процес формування ТЗТЗП при $d = 10$ мм

Коли діаметр змішувального стрижня збільшується до 10 мм, на стадії його заглиблення у верхню пластину внутрішня порожнина змішувального інструмента не заповнюється повністю. Загальна форма зони зварювання має підвищення в центрі та зниження з обох боків, при цьому під стрижнем чітко видно трикутні порожнини.

Поблизу цих порожнин спостерігаються помітні шаруваті сліди, що вказує на те, що метали в цих ділянках лише з'єднуються під дією тиску та високої температури, але не утворюють ефективного зварного з'єднання.

Як показано на рисунках 6.17 (a) і (b), межова лінія між верхньою та нижньою пластинами чітко простежується, що свідчить про відсутність утворення ефективного зварного шва.

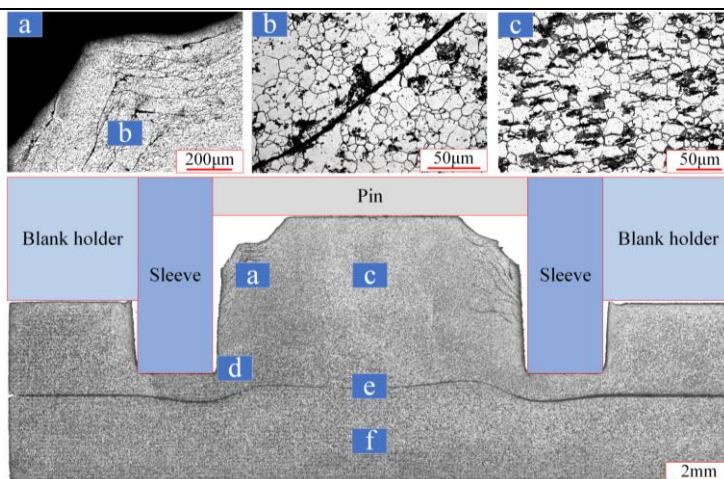


Рисунок 6.17 – Морфологія зони точкового зварювання на стадії заглиблення
($d = 10 \text{ мм}$)

Після занурення змішувального інструмента верхня і нижня пластини формують єдину структуру, порожнина заповнюється, але межова лінія все ще чітко простежується. У центрі спостерігається еліпсоподібна порожнина, як показано на рисунку 6.18. Помітно, що метал безпосередньо під змішувальним стрижнем зазнає висхідного переміщення. На цій стадії не відбувається ефективного зварювання, яке б запобігало відносному переміщенню пластин. Унаслідок пластичної деформації верхня і нижня пластини поступово розділяються, утворюючи вм'ятини.

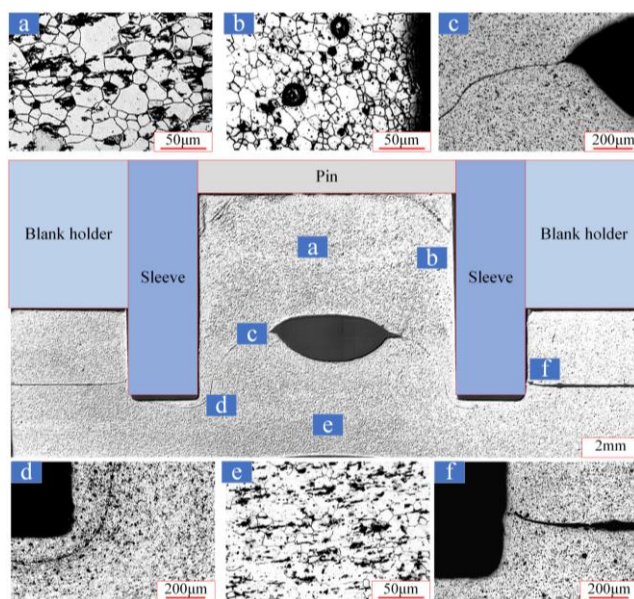


Рисунок 6.18 – Морфологія зони точкового зварювання на стадії заглиблення
($d = 10 \text{ мм}$)

Коли інструмент досягає стадії витримки, він підтримує високошвидкісне обертання, генеруючи значну кількість тепла, і зазначені вм'ятини повністю зникають. Структура зерен поблизу інструмента зазнає подальшого подрібнення, а її конкретна морфологія показана на рисунку 6.19. У цей момент під впливом підвищеної температури та безперервного плинку металу межева лінія отримує більший тиск протягом достатнього часу, що забезпечує завершення процесу зварювання з дифузією під тиском, про що свідчать збільшені зерна в області межевої лінії, показані на рисунку 6.20.

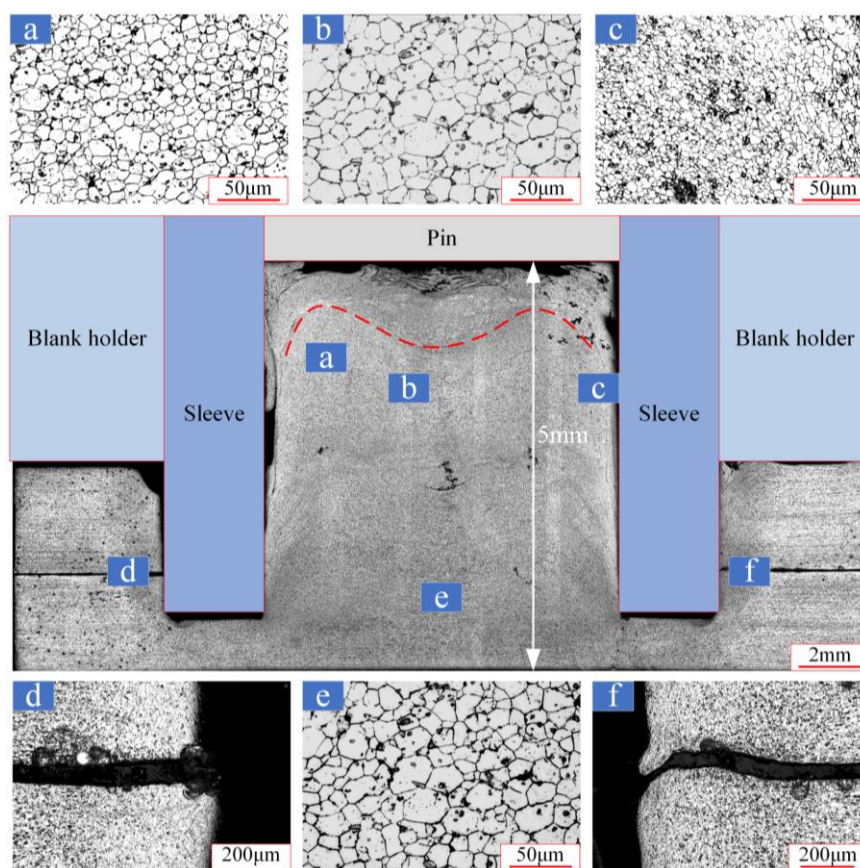


Рисунок 6.19 – Мікроструктура зони зварювання на стадії витримки
(d = 10 мм)

Водночас поза зоною дії інструмента межева лінія між верхньою та нижньою пластинами залишається чітко видимою (рисунки 6.19 (d) і (f)), що вказує на те, що на цій стадії ефективного зварювання відбулося лише в ділянці під змішувальним стрижнем.

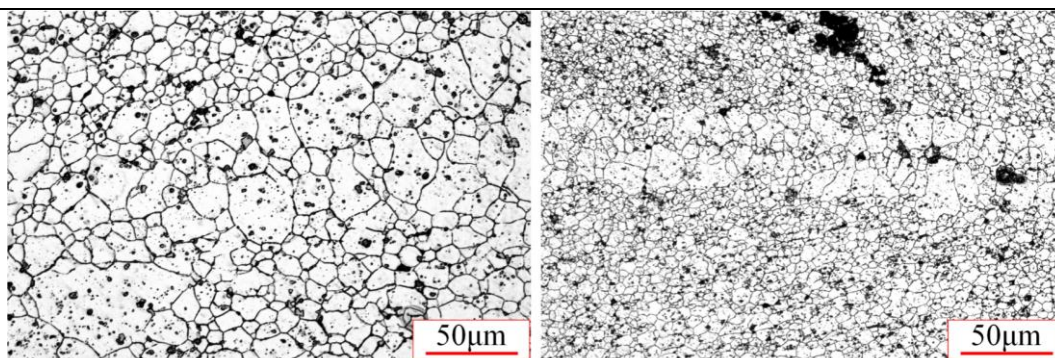


Рисунок 6.20 – Мікроструктура межової лінії на стадії витримки ($d = 10$ мм)

На рисунку 6.21 представлено металографічну мікроструктуру зони зварювання під час стадії зворотного заповнення нижньої пластини. Усередині зони зварного шва межа лінії не спостерігається, проте вона все ще чітко видима на зовнішньому боці змішувального інструмента, що показано на рисунку 6.21(d).

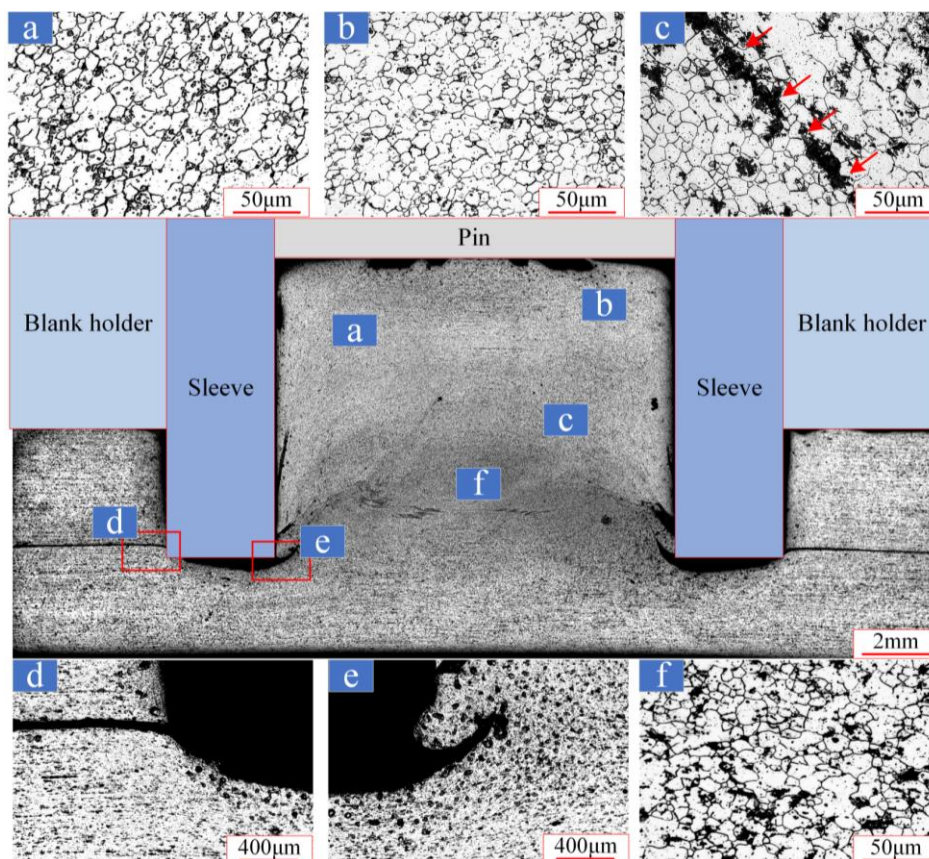


Рисунок 6.21 – Металографічна мікроструктура на стадії зворотного заповнення ($d = 10$ мм)

З рисунка видно, що ця межева лінія залишається незмінною і не зазнала деформації. З цього можна зробити висновок, що після переходу змішувальної гільзи до стадії зворотного заповнення продовжує відбуватися зсувна взаємодія між гільзою та зварюваними пластинами. Водночас тепло, згенероване на попередніх стадіях заглиблення та витримки, не забезпечує ефективного з'єднання меж верхньої та нижньої пластин у прилеглих ділянках.

На рисунку 6.22 показано металографічну мікроструктуру в момент, коли змішувальний інструмент продовжує рухатися вгору та виконує зворотне заповнення верхньої пластини. Чітко видно, що роздільна лінія між верхньою та нижньою пластинами в зоні зварювання все ще спостерігається, проте безпосередньо під змішувальною гільзою ця межа повністю зникла і була заміщена металом зворотного заповнення, екструдованим змішувальним стрижнем, специфічна морфологія якого показана на рисунку 6.22 (d).

З цього можна зробити висновок, що зварювання верхньої та нижньої пластин у цій ділянці відбувається повністю завдяки металу зворотного заповнення, який виконує роль з'єднувального матеріалу.

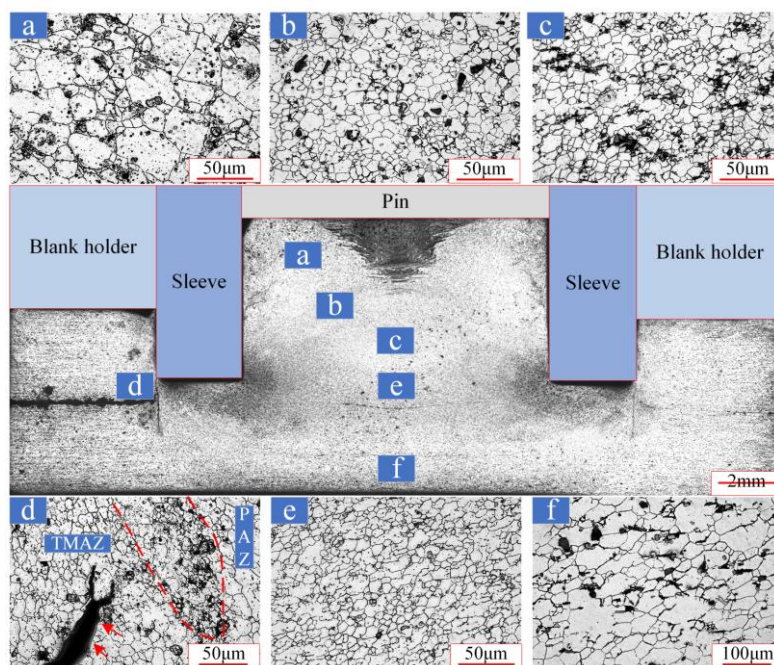


Рисунок 6.22 – Металографічна мікроструктура на стадії зворотного заповнення ($d = 10$ мм)

На цій стадії не спостерігається чіткого подрібнення зерен поблизу

змішувального інструмента, що підтверджує непряме свідчення того, що при цьому діаметрі інструмент діє переважно як зсувне різальне, а не зсувне адгезійне знаряддя.

На рисунку 6.23 (f) межова лінія між верхньою та нижньою пластинами чітко видима. Хоча поблизу цієї межі немає зазорів, усе ж зберігається значна кількість непошкодженого оксидного шару з поверхні листового матеріалу. Це свідчить про те, що на даному етапі було досягнуто зварювання з дифузією під тиском між верхньою та нижньою пластинами.

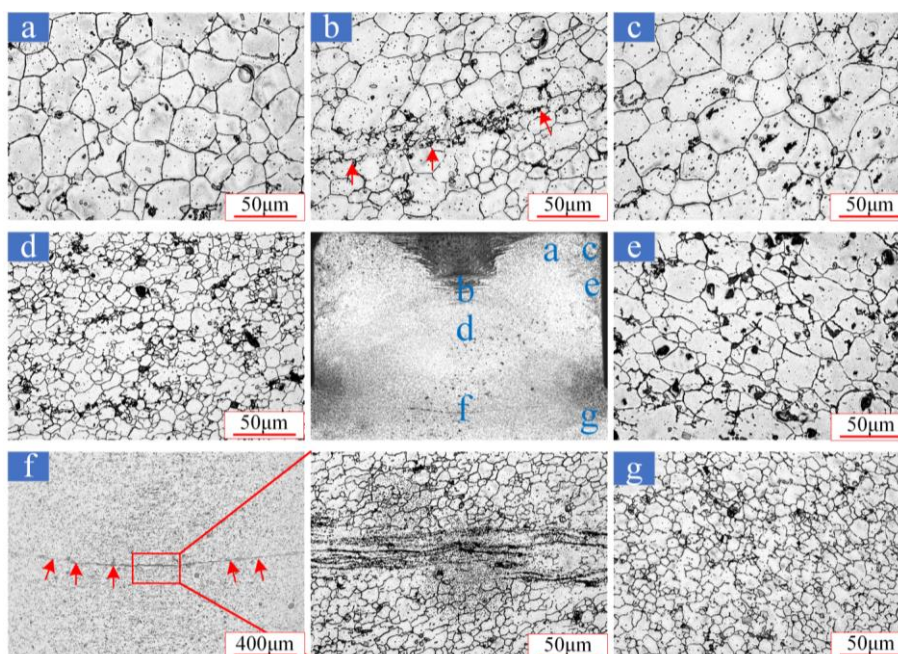


Рисунок 6.23 – Металографічна мікроструктура різних ділянок у зоні термічного впливу (ЗТВ) ($d = 10$ мм)

На рисунку 6.24 показано макроскопічну морфологію зони точкового зварювання при різних швидкостях заглиблення. В усіх випадках спостерігається розподіл у формі «U», при цьому ширина зони зварювання незначно зменшується зі збільшенням швидкості заглиблення. Також чітко видно, що лінія ЗЛЗ проходить через усю зону зварювання, що узгоджується з раніше отриманим висновком про те, що між верхньою та нижньою пластинами відбувається зварювання з дифузією під тиском.

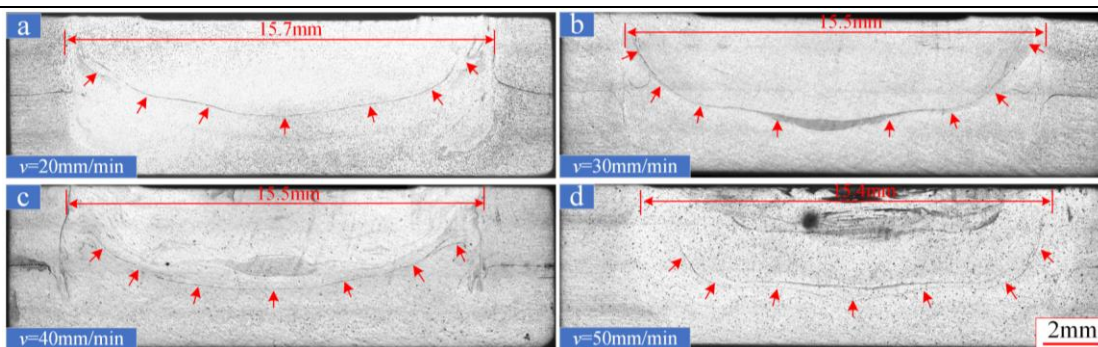


Рисунок 6.24 – Макроструктура зони точкового зварювання ($d = 10$ мм)

Додатково, в області, що піддається впливу змішувальної гільзи, лінія ЗЛЗ значною мірою руйнується внаслідок перемішування, і цей ступінь фрагментації помітно зменшується зі збільшенням швидкості заглиблення, як показано на рисунку 6.25.

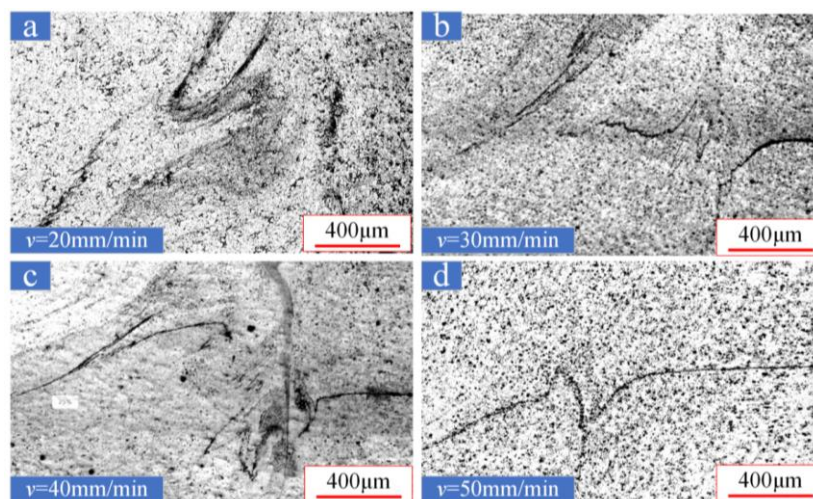


Рисунок 6.25 – Розподіл «ЗЛЗ» при різних швидкостях заглиблення ($d = 10$ мм)

На рисунку 6.26 показано розподіл зерен у зоні стику між нижньою частиною зони перемішування та основним металом. Видно, що вздовж межі зони перемішування формується смуга великих зерен, яка проходить через усю зону точкового зварювання (рис. 6.26 (a)). Розмір зерен з обох боків цієї зони суттєво відрізняється: у верхній частині зони перемішування зварного шва зерна менші, тоді як у нижній частині основного металу вони більші (рис. 6.26 (b)). Усередині смуги великого зерна зерна мають переважно квадратну форму,

при цьому один із їхніх країв паралельний до межі зони перемішування, що явно відрізняє їх від гексагональних зерен інших ділянок (рис. 6.26 (с) і 6.26 (d)).

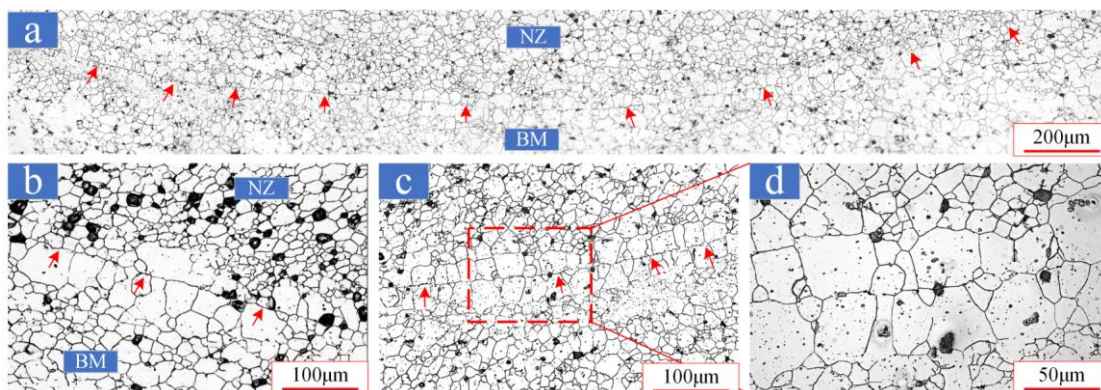


Рисунок 6.26 – Розподіл зерен у нижній частині зони перемішування зварного шва ($d = 10$ мм)

Таким чином, при діаметрі змішувального інструмента 10 мм інструмент більше не здатний обертати метал усередині всієї зони точкового зварювання, а тим більше створювати виражену локальну зону зсувного обертання. Він може лише викликати зсув і обертання пластичного металу у невеликому діапазоні поблизу себе, формуючи чітку зону зсуву.

Крім того, для цього діаметра інструмента переріз змішувальної гільзи є найбільшим, що зумовлює найбільший опір на стадії заглиблення, але одночасно сприяє плавному підйому металу всередині зони зварювання. У результаті метал безпосередньо під гільзою не накопичується і не формує високотискову зону, а легко заповнює порожнину, утворену рухом стрижня вгору. Це призводить до того, що роздільна лінія між верхньою та нижньою пластинами під гільзою лише вигинається і деформується, не утворюючи ефективного з'єднання.

Водночас порожнина безпосередньо під стрижнем швидко і ефективно заповнюється, а теплова потужність інструмента в цій зоні є значно вищою. Відносна швидкість зсуву між металом поблизу центральної осі зварного шва та інструментом мінімальна, що ускладнює формування зсувного ковзання.

Однак під дією інтенсивного екструзійного руху металу вгору та високої температури відбувається зварювання з дифузією під тиском між різнорідним матеріалом і стрижнем, а також формується локальна зона зсувного обертання у цій ділянці.

Отже, роздільна лінія між верхньою та нижньою пластинами зазнає лише вигинальної деформації, яка відповідає формі плинучого пластичного металу на початковій стадії заглиблення, але не утворює ефективного з'єднання, що проілюстровано на рисунку 6.27.

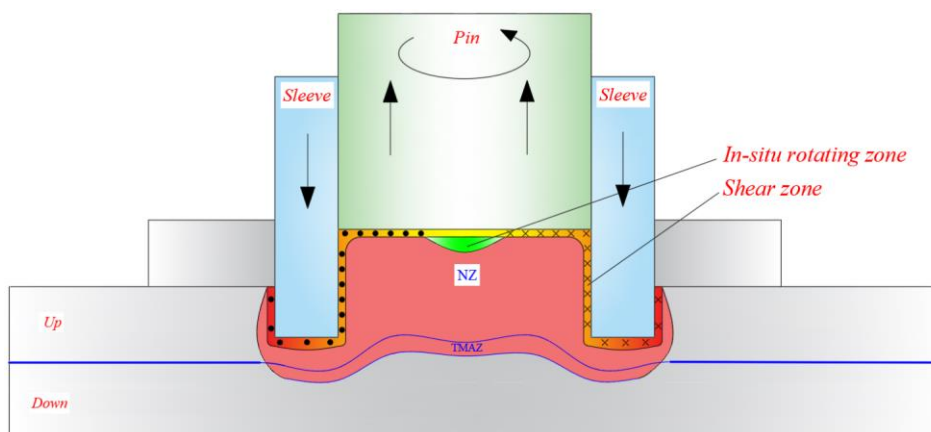


Рисунок 6.27 – Схема стадії заглиблення ($d = 10$ мм)

У міру просування стадії заглиблення змішувальна гільза проходить крізь роздільну лінію між верхньою та нижньою пластинами та входить у нижню пластину. Роздільна лінія безпосередньо під гільзою повністю руйнується під дією сильного екструзійного тиску та дроблення, створюваних змішувальним інструментом, унаслідок чого формується виразна зона перемішування та дроблення.

Водночас роздільна лінія під змішувальним стрижнем продовжує зазнавати вираженого вигину вгору та деформації, набуваючи в основному параболічної форми. Як видно з металографічної мікроструктури на стадії витримки, на цій ділянці параболічна форма роздільної лінії вже починає супроводжуватися зварюванням з дифузією під тиском.

Однак зовнішня ділянка роздільної лінії, яка знаходиться за межами впливу змішувальної гільзи, усе ще піддається сильній дії зсувного різання і

зазнає лише незначної деформації без формування будь-якого з'єднання, що проілюстровано на рисунку 6.28.

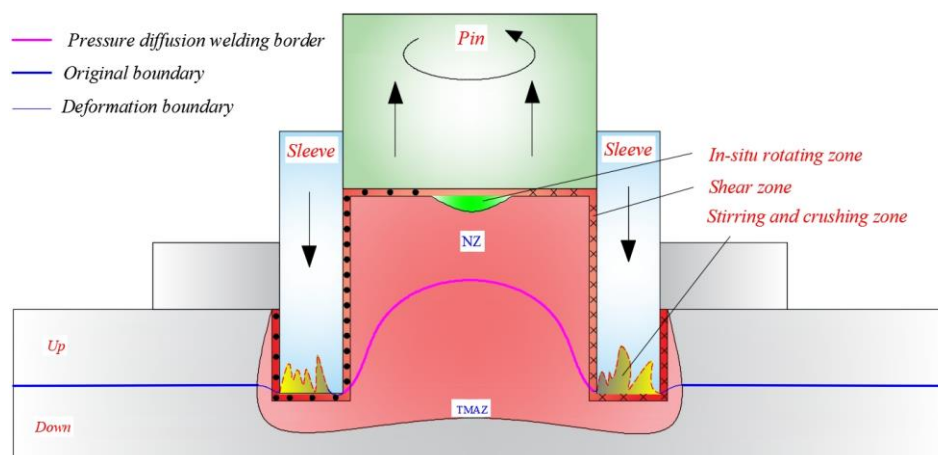


Рисунок 6.28 – Схема стадії заглиблення (plug stage) ($d = 10 \text{ мм}$)

З отриманих результатів можна зробити висновок, що при такому діаметрі змішувального інструмента зсувний ефект на межі, створюваний інструментом, домінує протягом усього процесу зварювання. У металографічній структурі сформованої зони точкового зварювання чітко спостерігається межа між ділянкою впливу інструмента та основним металом, а також роздільна лінія між верхньою та нижньою пластинами безпосередньо під змішувальним стрижнем, який залишається видимою на будь-якій стадії процесу.

Хоча під змішувальною гільзою ця лінія повністю руйнується під час формування зварного з'єднання, сліди її фрагментації залишаються помітними. Крім того, на межі між зоною перемішування та зоною термічного впливу формується виразна смуга великих зерен, що вказує на те, що під час зворотного заповнення інструмент екструдує метал усередині зони зварювання та поєднує його з металом у зоні термічного впливу в умовах зварювання з дифузією під тиском.

У цьому процесі змішувальний інструмент завдяки сильному зсувному різальному ефекту забезпечує достатнє нагрівання та сприятливі умови для з'єднання поверхонь. Таким чином, для опису форми плинучого

металу в зоні точкового зварювання при цьому діаметрі інструмента можна використовувати комбінацію зсувного тертя з обох боків і центрального осьового плину.

Для цього випадку процес зварювання може бути описаний як: «зварювання з дифузією під тиском є основним механізмом, заповненим комбінацією тертевого заклепкового з'єднання».

6.3 Висновки до розділу

У цьому розділі за допомогою методу миттєвої зупинки були отримані макро- та мікроструктури ТЗТЗП на різних стадіях, а також визначено плинність металу в зоні точкового зварювання шляхом поєднання результатів аналізу напруженого та температурного полів, отриманих методом математичного моделювання. В результаті було встановлено механізм формування зони ТЗТЗП для різних діаметрів змішувальних інструментів.

Отримано такі висновки:

1. Плин металу в зоні точкового зварювання в основному має характер вертикального спірального руху. Під час процесу зварювання формується локальна зона зсувного обертання (in-situ spin shear region), ширина і тривалість якої істотно залежать від діаметра змішувального інструмента та швидкості його заглиблення. Це безпосередньо впливає на морфологію лінії ЗЛЗ у зоні зварювання. При збільшенні діаметра інструмента метал безпосередньо під змішувальним стрижнем має тенденцію переміщуватися більш одновекторно вздовж осі, що суттєво впливає на товщину і ширину лінії ЗЛЗ. Крім того, по обидва боки зони зварювання чітко виявляються зони тертевого заклепкового з'єднання, які відіграють важливу роль у формуванні зварного шва.

2. При діаметрі інструмента 6 мм протягом усього процесу зварювання спостерігається сильний ефект зсувної адгезії між інструментом і розм'якшеним при високій температурі металом, що зумовлює виражений загальний обертальний рух. Це узгоджується з результатами моделювання та

описується моделлю спірального всмоктування-зворотного заповнення з інжекційним накопиченням. Зона зсувного обертання формується на стадії заглиблення і забезпечує зварювання верхньої та нижньої пластин. Рух металу в зоні зварювання можна охарактеризувати як зсувне тертя з локальним обертанням, що в підсумку формує зварний шов у вигляді «повного тертевого заклепкового з'єднання».

3. При діаметрі інструмента 10 мм механізм взаємодії змінюється: замість адгезійної дії домінує зсувний ефект. Механізм формування описується моделлю зсувно-екструзійного формування – зварювання з дифузією під тиском – накопичення тертевого заклепкового з'єднання. Лінія ЗЛЗ у зоні термічного впливу існує на всіх стадіях, тоді як у зоні інтенсивного перемішування вона повністю руйнується після завершення зварювання, хоча її сліди залишаються помітними. На межі між нижньою частиною зони перемішування і зоною термомеханічного впливу утворюється виразна смуга великих зерен, що свідчить про те, що зварювання в цій зоні відбувається у формі зварювання з дифузією під тиском під час зворотного заповнення. Отже, плин металу в зоні зварювання можна описати як поєднання бічного зсувного тертя та центрального осьового руху, а процес зварювання – як «зварювання з дифузією під тиском є основним механізмом, доповненим комбінацією тертевого заклепкового з'єднання».

ВИСНОВКИ

У цьому розділі проведено комплексні експериментальні роботи з ТЗТЗП товстих пластин із алюмінієвого сплаву 6061-Т6 (товщина 3 мм). Основна увага зосереджена на змішувальному інструменті, зокрема досліджено вплив п'яти різних діаметрів стрижня на формування зони точкового зварювання. Дослідження виконано для різних швидкостей обертання та зварювання, з аналізом макро- і мікроструктури, мікротвердості, міцності на розтяг і зсув, втомних властивостей, а також динамічних змін напружень і деформацій. Крім того, побудовано математичну модель у програмі Deform V11.0, що дало змогу отримати дані про поля напружень, температури, швидкостей, траєкторії частинок і деформацію сітки на різних стадіях зварювання. Отримані результати дозволили пояснити механізм формування ТЗТЗП.

Основні висновки:

1. Вплив діаметра стрижня на формування та якість зварювання:
 - Вдалося виконати бездефектне зварювання алюмінієвого сплаву 6061-Т6 товщиною 3 мм;
 - Інструменти з малим діаметром мають низький тепловий внесок, що може спричинити недостатню пластичність і появу дугоподібних або вузлових поверхневих дефектів;
 - Інструменти з великим діаметром дають надлишковий тепловий внесок, що призводить до локального плавлення і можливого металургійного з'єднання інструмента з металом, що в кінцевому підсумку викликає дефекти через відшарування матеріалу;
 - Морфологія зони зварювання у розрізі є подібною для різних параметрів, при цьому ЗВШ має найдрібніші зерна, а ЗВГ – нерівномірний розподіл зерен (грубіші біля ЗВШ і дрібніші біля ЗТВ);
 - Межа між ЗВГ і ЗТВ визначається як «зона з'єднання тертевим заклепковим зварюванням», що має вирішальне значення для якості

зварювання.

2. Вплив параметрів процесу на механічні властивості:

- Максимальна міцність на зсув для стрижня діаметром 6 мм становить 9,27 кН, а для 10 мм – 18,16 Кн;
- «Hook» є слабкою ділянкою та місцем зародження тріщини під час зсувного навантаження; його форма і кут відносно зони зварювання впливають на механізм руйнування;
- Для інструмента 6 мм руйнування відбувається переважно на межі, а для інших діаметрів частіше виникають руйнування гільзи;
- Твердість у зоні зварювання нижча, ніж у базовому матеріалі: найвища у ЗВГ на верхній поверхні, найнижча у ЗТВ;
- Втомні властивості: під осьовим навантаженням зона зварювання демонструє високочастотну втому, причому довговічність зростає з діаметром інструмента; під крутильними навантаженнями – низькочастотну втому, при цьому збільшення діаметра підвищує довговічність лише за малих навантажень.

3. Математична моделювання на базі Deform V11.0 (точність 85%):

- Модель показала, що на стадії витримки спостерігаються пікові температури, які перевищують температуру відпалу базового матеріалу, що суттєво впливає на пластичний плин і заповнення порожнини, визначаючи якість формування шва;
- Зі збільшенням діаметра інструмента зростає пікова температура;
- Відстеження частинок показало, що інструменти з малим діаметром спричиняють виражений гвинтоподібний рух металу в просторі, тоді як зі збільшенням діаметра кількість витків спіралі зменшується, але їх розмір зростає.

4. Механізм формування зварювання:

- Металографічні спостереження і математичне моделювання підтвердили існування локальної зони зсувного обертання, що впливає на

товщину і ширину внутрішньої лінії ЗЛЗ;

– Для інструмента 6 мм сильна зсувна адгезія між інструментом і металом зумовлює виражений загальний обертальний рух, який можна описати як зсувне тертя – локальне обертання, що забезпечує повне фрикційно-заклепкове з'єднання. Метал рухається за моделлю спірального всмоктування-зворотного заповнення з шаровим інжекційним накопиченням;

– Для інструмента 10 мм взаємодія змінюється: домінує зсувна дія. Механізм формування описується як зсувно-екструзійне формування – зварювання з дифузією під тиском – накопичення тертевого заклепкового з'єднання. Плин металу характеризується бічним зсувним тертям і центральним осьовим потоком, а процес зварювання описується як «зварювання з дифузією під тиском є основним механізмом, доповненим фрикційно-заклепковим з'єднанням».

Перспективи розвитку

Дослідження автора та інших науковців показують, що технологія рефілінгового точкового зварювання тертям з перемішуванням (ТЗТЗП) істотно підвищує якість зварювання легких сплавів. Проте складність налаштування параметрів процесу обмежує її широке застосування. На основі отриманих результатів можна визначити такі напрями подальших досліджень:

1. Вплив діаметра змішувального інструмента на властивості зони зварювання. У цьому дослідженні було протестовано п'ять діаметрів, і встановлено, що максимальна міцність на зсув при накладанні зростає зі збільшенням діаметра інструмента. Однак залишається невідомим, чи призведе подальше збільшення діаметра до покращення властивостей зварного з'єднання, що потребує додаткових експериментів і аналізу.

2. Оптимізація параметрів процесу для підвищення продуктивності. Використані у роботі параметри були досить консервативними, що зумовило триваліший час зварювання порівняно з традиційним зварюванням опором. Це знижує ефективність виробництва. У подальших дослідженнях необхідно

зосередитися на підвищенні швидкості зварювання, що дозволить скоротити загальний час циклу та тепловий внесок, покращити умови відпалу для термозміцнюваних легких сплавів і, як наслідок, підвищити якість зварного з'єднання.

3. Вплив співвідношення геометричних параметрів стрижня та гільзи. У цьому дослідженні основна увага приділялася діаметру змішувального інструмента, але не було детально вивчено співвідношення між стрижнем і гільзою та геометричні особливості гільзи. Ці чинники суттєво впливають на плин металу, умови формування з'єднання та тепловий внесок. Подальші дослідження в цьому напрямі відкриють нові перспективи та стануть потужним драйвером розвитку технології ТЗТЗП.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bhardwaj N., Ganesh Narayanan R., Dixit U.S. & Hashmi M.S.J. Recent developments in friction stir welding and resulting industrial practices, *Advances in Materials and Processing Technologies*, 2019, 5:3, 461-496.
2. Kallee SW. Industrial applications of friction stir welding. In: Lohwasser D, Chen Z, editors. *Friction stir welding from basics to applications*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2010. p. 118–163.
3. Delany F, Kallee SW, Russell MJ. Friction stir welding of aluminium ships. *Electr Weld Mach*, 2007; 6:19–29.
4. Kawasaki. Kawasaki becomes first in Japan to perfect friction stir welding technology, 2002 Aug [cited 2019 Jun 1].
5. Nikkeikin. FSW (Friction Stir Welding) technology from plate to sheet, 2018 [cited 2019 Jun 1].
6. Dilthey U. & Stein L. Multimaterial car body design: challenge for welding and joining, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2006, 11:2, 135-142, DOI: [10.1179/174329306X85967](https://doi.org/10.1179/174329306X85967) .
7. Haghshenas M., Gerlich A.P. Joining of automotive sheet materials by friction-based welding methods: A review. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2018, 21:1, pages 130-148.
8. Zhang Shufang, Li Hongyan, ZHAO Chengsheng. Mechanics and Corrosion Behavior of 2219 Aluminum Alloy FSW and TIG Welding Joints[J]. *Hot Working Technology*, 2019, 48(9): 86-90.
9. Li Zhijie, WANG Wenjia, LIU Zhenghai. Research Status and Prospect of 7xxx Series Aluminum Alloy Welding[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(12): 2594-2602.
10. Liu Zhipeng, Wang Guangming. Aluminum alloy laser welding process and its progress[J]. *Welding Technology*, 2021, 50(4): 25-29.
11. Wang Yong, LIU Weiqiang. Research Status and Development Trend of Aluminum Alloy Welding Technology[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022,

58(1): 100-107.

12. Wu Xiaodong, Li Yang. Research Progress on Welding Defects and Control Methods of Aluminum Alloys[J]. Materials Research and Application, 2023, 11(3): 35-40.

13. Zhou Li, Zhou Weilu, Du Zhengyong, Zhao Ruifeng, Meng Fanxin, Feng Jicai. Research status of stir-friction spot welding technology [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014 (05): 1-5 + 10.

14. Buffa G, Fratini L, Piacentini M. On the influence of tool path in friction stir spot welding of aluminum alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 208(1-3): 309~317.

15. Burford D A, Tweedy B M, Widener C A. Fatigue crack growth in integrally stiffened panels joined using friction stir welding and swept friction stir spot welding[J]. Journal of ASTM International, 2008, 5(4):1~18.

16. Brown J, Widener C, Burford D, et al. Corrosion and fatigue evaluation of swept friction stir spot welding through sealants and surface treatments[C]. Friction Stir Welding and Processing V – TMS 2009 Annual Meeting and Exhibition, San Francisco, United States, 2009.

17. Brown J, Widener C, Moore G, et al. Evaluation of swept friction stir spot welding in Al 2219-T6[C]. Friction Stir Welding and Processing V – TMS 2009 Annual Meeting and Exhibition, San Francisco, United States, 2009.

18. Badarinarayan H, Yang Q, Okamoto K. Effect of weld orientation on static strength and failure mode of friction stir stitch welds in lap-shear specimens of aluminum 6022-T4 sheets[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2011, 34(11): 908~920.

19. Tozaki Y., Uematsu Y. and Tokaji K., A newly developed tool without probe for friction stir spot welding and its performance, J. Mater. Process. Technol., 2010, 210(6–7), 844.

20. Reilly A., Shercliff H., Chen Y. and Prangnell P., Modelling and visualisation of material flow in friction stir spot welding, J. Mater. Process. Technol.,

2015, 225, 473 (2015).

21. Cox C. D, Gibson B. T., DeLapp D. R, Strauss A. M. and Cook G. E., A method for double-sided friction stir spot welding, J. Manuf. Processes. 2014, 16(2),241.

22. Badarinarayan H., Hunt F. and Okamoto K., Friction stir spot welding. In Friction Stir Welding and Processing, R. S. Mishra and M. W. Mahoney(eds.), ASM International, Materials Park,2007, 235.

23. Chilling C, dos Santos J. Method and device for joining at least two adjoining work pieces by friction welding[P], Google Patents, 2004.

24. Ojo OO, Taban E, Kaluc E. Friction stir spot welding of aluminum alloys: A recent review[J]. Materials Testing, 2015, 57(7-8): 609-27.

25. Zhou Li, Zhou Weilu, Du Zhengyong, et al. Research status of stir-friction spot welding technology [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014, (5): 1-5,10.

26. Haribalaji V., Sampath Boopathi, Mohammed M. Asif, Jeyakumar M., Ram Subbiah, Anton K., Savio Lewise. (2021) Influences of Friction stir tool parameters for joining two similar AZ61A alloy plates. Materials Today: Proceedings 419–422.

27. Asmael M.B.A., Glaissa M.A.A. Effects of rotation speed and dwell time on the mechanical properties and microstructure of dissimilar aluminum-titanium alloys by friction stir spot welding (FSSW). Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2020, 51:7, pages 1002-1008.

28. Sabah Khammass Hussein, Isam Tareq Abdullah, Abbas Khammas Hussein. Spot lap joining of AA5052 to AISI 1006 by aluminium extrusion via friction forming technique. Multidiscipline Modeling in Materials and Structures, 2019, 15:6, pages 1337-1351.

29. Majid Pouranvari. Critical assessment 27: dissimilar resistance spot welding of aluminium/steel: challenges and opportunities. Materials Science and Technology, 2017, 33:15, 1705-1712.

-
30. Zhibo Dong, Qi Song, Xinxin Ai, Zan Lv. Effect of joining time on intermetallic compound thickness and mechanical properties of refill friction stir spot welded dissimilar Al/Mg alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 42, pages 106-112.
31. Boucherit A., Avettand-Fènoël M.-N., Taillard R. Effect of a Zn interlayer on dissimilar FSSW of Al and Cu. *Materials & Design*, 2017, 124, pages 87-99.
32. Fu Tian, Li Wenya, Yang Xiawei, et al. Mixing friction spot welding and its research status [J]. *Material Engineering*, 2015, 43 (4): 102-114.
33. Zhao Yanhua, Zhang Lina, Liu Jingduo, et al. Introduction to stir friction spot welding technology [J]. *Aerospace Manufacturing technology*, 2009, (2): 1-5.
34. Wang Tao, Li Yong. Research progress of stir-mixing friction spot welding [J]. *Journal of Welding*, 2020, 41 (1): 56-61.
35. Liu Bin, Chen Kai. Research status and development trend of mixing friction spot welding of aluminum alloy [J]. *Material Engineering*, 2021, 49 (2): 22-29.
36. Zhang Zhiqiang, Zhang Xin. Research status and prospect of friction spot welding with high melting point metal stirring [J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32 (5): 355-362.
37. Schneider J., Kumar A., Friction Stir Spot Welding of High Strength Steels. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 62: 101-109.
38. Mironov S. M., Sato Y. S., Recent Developments in Friction Stir Spot Welding. *International Journal of Materials Joining*, 2020, 58(6): 540-548.
39. Nasr A. M., Abdel Aty A. E., Application of Friction Stir Spot Welding in Aluminum Alloys. *Materials & Design*, 2022, 195: 111087.
40. Rosales D., Bilici M. K., Numerical and Experimental Investigations in FSSW. *Metals*, 2021, 11(7): 964.
41. Huang Wei, LI Jie. Development and application of equipment for friction stir spot welding[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(4): 112-118.
42. Li Ming, ZHANG Wei. Application of Numerical Simulation in Friction Stir Spot Welding[J]. *Materials Science and Engineering*, 2023, 49(7): 88-94.

-
43. Morisada Y., Fujii H., Innovative Applications of FSSW in Aerospace Components. *Welding in the World*, 2023, 67: 129-138.
44. Shen Z., Chen Y., Hou J. S. C., Yang X. & Gerlich A. P. Influence of processing parameters on microstructure and mechanical performance of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium alloy, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, 20:1, 48-57.
45. Chengcong Zhang, Juyong Cao & Amir A. Shirzadi. Refill Friction Stir Spot Welding (Refill FSSW) of magnesium lithium alloys: effects of air and argon cooling, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2021, 26:3, 236-243, DOI: [10.1080/13621718.2021.1884801](https://doi.org/10.1080/13621718.2021.1884801) .
46. Zhao Y, Liu H, Chen S, et al. Effects of sleeve plunge depth on microstructures and mechanical properties of friction spot welded alclad 7B04-T74 aluminum alloy. *Mater Des (1980–2015)*. 2014; 62:40–46.
47. Campanelli LC, Suhuddin UFH, Antonialli AÍ, et al. Metallurgy and mechanical performance of AZ31 magnesium alloy friction spot welds. *J Mater Process Technol*, 2013;213(4):515–521.
48. Rosendo T, Parra B, Tier M, et al. Mechanical and microstructural investigation of friction spot welded AA6181-T4 aluminium alloy. *Mater Des*. 2011; 32(3):1094–1100.
49. Kubit A, Bucior M, Wydrzyński D, et al. Failure mechanisms of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium alloy single-lap joints. *Int J Adv Manuf Technol*. 2018; 94(9–12):4479–4491.
50. Mahoney M, Rhodes C, Flintoff J, et al. Properties of friction-stir-welded 7075 T651 aluminum. *Metall Mater Trans A*, 1998; 29(7):1955–1964. doi: [10.1007/s11661-998-0021-5](https://doi.org/10.1007/s11661-998-0021-5)
51. Reimann M, Goebel J, dos Santos JF. Microstructure and mechanical properties of keyhole repair welds in AA 7075-T651 using refill friction stir spot welding. *Mater Des*. 2017; 132:283–294. doi: [10.1016/j.matdes.2017.07.013](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.07.013).
52. Brzostek R, Suhuddin U, dos Santos J. Fatigue assessment of refill friction stir spot weld in AA 2024–T3 similar joints. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 2018;

41(5):1208–1223.

53. De Castro, Camila Caroline, et al. "Taguchi approach for the optimization of refill friction stir spot welding parameters for AA2198-T8 aluminum alloy." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 99, 2018, 1927-1936.

54. Xu, Zhiwu, et al. "Refill friction stir spot welding of 5083-O aluminum alloy." *Journal of Materials Science & Technology* 34.5, 2018, 878-885.

55. Zhou, L., et al. "Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded 6061-T6 aluminum alloy." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 92, 2017, 3425-3433. DOI:10.1007/s00170-017-0359-1

56. Zhang, Hai-feng, et al. "Effect of tool plunge depth on the microstructure and fracture behavior of refill friction stir spot welded AZ91 magnesium alloy joints." *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 28, 2021, 699-709.

57. Fu, Banglong, et al. "Improved mechanical properties of cast Mg alloy welds via texture weakening by differential rotation refill friction stir spot welding." *Scripta Materialia* 203, 2021, 114113.

58. Zhou, L., et al. "Effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded 6061-T6 aluminum alloy." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 92, 2017, 3425-3433.

59. Li, Gaohui, et al. "Microstructural evolution and mechanical properties of refill friction stir spot welded alclad 2A12-T4 aluminum alloy." *Journal of Materials Research and Technology* 8.5, 2019, 4115-4129.

60. Silva, Bruno Hessel, et al. "Refill friction stir spot welding of AA6082-T6 alloy: Hook defect formation and its influence on the mechanical properties and fracture behavior." *Materials Science and Engineering: A* 773, 2020, 138724.

61. Shen, Junjun, et al. "Texture development and material flow behavior during refill friction stir spot welding of AlMgSc." *Metallurgical and Materials Transactions A* 49, 2018, 241-254.

62. Sun G D, Zhou L, Zhang R X, et al. Effect of sleeve plunge depth on

interface/mechanical characteristics in refill friction stir spot welded joint[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33: 551-560.

63. Ji, Shude, et al. "Effect of tool geometry on material flow behavior of refill friction stir spot welding." *Transactions of the Indian Institute of Metals* 70, 2017, 1417-1430.

64. Md. Reza-E-Rabby, Kenneth Ross, Martin McDonnell, Scott A Whalen, Numerical simulation and experimental validation of joint performance in aluminum-steel lap welds formed by friction stir dovetailing, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 277, 2020, 116459, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116459>.

65. Yousefi A, Serjouei A, Hedayati R, Bodaghi M. Fatigue Modeling and Numerical Analysis of Re-Filling Probe Hole of Friction Stir Spot Welded Joints in Aluminum Alloys. *Materials*. 2021, 14(9):2171.

66. Shen Z, Liu X, Li D, Ding Y, Hou W, Chen H, Li W, Gerlich AP. Interfacial Bonding and Mechanical Properties of Al/Mg Dissimilar Refill Friction Stir Spot Welds Using a Grooved Tool. *Crystals*, 2021, 11(4):429.

67. Shen Z., Ding Y., Chen J., Fu L., Liu X. C., Chen H., Guo W. & Gerlich A. P. Microstructure, static and fatigue properties of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium alloy using a modified tool, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, 24:7, 587-600,

68. Shen Z, Ding Y, Gopkalo O, et al. Effects of tool design on the microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welding of dissimilar Al alloys. *J Mater Process Technol*. 2018; 252:751–759.

69. Shen, Z., et al. "Effects of tool design on the microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welding of dissimilar Al alloys." *Journal of Materials Processing Technology* 252, 2018, 751-759.

70. Ding Y, Shen Z, Gerlich A. Refill friction stir spot welding of dissimilar aluminum alloy and AlSi coated steel. *J Manuf Process*. 2017; 30:353–360.

71. Shen Z, Chen J, Ding Y, et al. Role of interfacial reaction on the mechanical performance of Al/steel dissimilar refill friction stir spot welds. *Sci*

Technol Weld Join. 2018; 23(6):462–477.

72. Amancio-Filho S, Bueno C, Dos Santos J, et al. On the feasibility of friction spot joining in magnesium/fiber-reinforced polymer composite hybrid structures. *Mater Sci Eng A*. 2011; 528(10–11):3841–3848.

73. Chen Y, Chen J, Shalchi Amirkhiz B, et al. Microstructures and properties of Mg alloy/DP600 steel dissimilar refill friction stir spot welds. *Sci Technol Weld Join*. 2015; 20(6):494–501.

74. Suhuddin U, Fischer V, Kroeff F, et al. Microstructure and mechanical properties of friction spot welds of dissimilar AA5754 Al and AZ31 Mg alloys. *Mater Sci Eng A*. 2014; 590:384–389.

75. Shen Z, Ding Y, Chen J, et al. Comparison of fatigue behavior in Mg/Mg similar and Mg/steel dissimilar refill friction stir spot welds. *Int J Fatigue*. 2016; 92:78–86.

76. Li, Peng, et al. "Interfacial microstructure and mechanical properties of dissimilar aluminum/steel joint fabricated via refilled friction stir spot welding." *Journal of Manufacturing Processes* 49, 2020, 385-396.

77. Ding, Y., Z. Shen, and A. P. Gerlich. "Refill friction stir spot welding of dissimilar aluminum alloy and AlSi coated steel." *Journal of Manufacturing Processes* 30, 2017, 353-360.

78. Shen, Zhikang, et al. "Refill friction stir spot welding Al alloy to copper via pure metallurgical joining mechanism." *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 34, 2021, 1-8.

79. Cardillo, Maria EB, et al. "Effect of friction spot welding parameters on the joint formation and mechanical properties of Al to Cu." *Welding in the World* 63, 2019, 33-41.

80. Shen, Z., et al. "Effects of tool design on the microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welding of dissimilar Al alloys." *Journal of Materials Processing Technology* 252, 2018, 751-759.

81. Dong, Zhibo, et al. "Effect of joining time on intermetallic compound thickness and mechanical properties of refill friction stir spot welded dissimilar

Al/Mg alloys." *Journal of Manufacturing Processes* 42, 2019, 106-112.

82. Zou Y, Li W, Yang X, et al. Microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded joints: Effects of tool size and welding parameters[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 5066-5080.

83. Du Yanfeng, Bai Jingbin, Tian Zhijie, et al. Temperature simulation of 2219 aluminum alloy [J]. *Journal of Welding*, 2014,35 (08): 57-60 + 70 + 115-116.

84. Fish Haidong, Cui Guohua, Zhang Zhenshan, et al. Study on heat generation model and temperature field of double axial shoulder [J]. *Light Industry Machinery*, 2019,37 (04): 35-41.

85. Feng Tiantao, Zhang Xiaohui. Analytical model of heat transfer and plastic flow of 3 D stirred friction welding [J]. *Journal of Welding*, 2013,34 (07): 105-108 + 118.

86. Tang H W, Li W Y, Feng X S, et al. Microstructure and mechanical properties of refill friction stir spot welded Al–Mg–Li alloy joints[J]. *Welding in the World*, 2023, 67(2): 385-393.

87. F, Fu B, Shen J, et al. Quasi-in-situ observation of microstructure at the friction interface: Shear deformation, dynamic recrystallization and mechanical responses during friction welding process[J]. *Materials Characterization*, 2023, 200: 112911.

88. Zlatanović D L, Bergmann J P, Baloš S, et al. Influence of Strain Rate on Metallurgical and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Aluminium Joints[J]. *Advanced Technologies and Materials*, 2023, 48(2): 37-43.

89. Li Y, Sun G, Zhang Z, et al. Texture evolution of refill friction stir spot welding in alclad 2A12-T42 aluminum alloy[J]. *Materials Characterization*, 2023, 205: 113289.

90. Shen, Junjun, et al. "Texture development and material flow behavior during refill friction stir spot welding of AlMgSc." *Metallurgical and Materials Transactions A* 49, 2018, 241-254.

91. Łogin W, Śliwa R E, Ziaja W, et al. The influence of modification of the geometry of the front surface of the RFSSW tool inner sleeve on the fatigue life of

joints during joining clad sheets made of aluminum alloy 2024-T3[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2025, 25(1): 1-12.

92. Zhong H, Xu G, Dong J, et al. Research on the Surface-State Parameterization of a Refill Friction Stir Spot Welding Joint Made of Aluminum Alloy and Its Connection to the Fracture Mode[J]. Materials, 2024, 17(3): 762.

93. Wang Y, Li P, Jiang H, et al. Mechanical Properties and Fracture Behavior of the Refill Friction Stir Spot Welding Dissimilar Aluminum Alloy Joints[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2024, 77(11): 3821-3828.

94. Sioutis I, Tserpes K. Quasi-static and fatigue crack growth simulation in co-consolidated thermoplastic joints containing crack arrest features[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 157: 107904.

95. Peng Yan, Zhang Wei, Li Rujun, et al. Overview of the whole life process and engineering application of metal fatigue injury [J]. Journal of Plastic Engineering, 2024, 31 (04): 117-130.

96. Sioutis I, Tserpes K, Tsiangou E, et al. Experimental evaluation of Refill friction Stir spot Welds (RFSSW) as crack arrest features in co-consolidated thermoplastic laminates[J]. Composite Structures, 2023, 309: 116754.

97. ZHANG Jun, PENG Jinfang, XU Zhibiao, JIN Xiao, ZHU Minhao. Torsional Fretting Fatigue Damages of 7075 Aluminum Alloy[J]. TRIBOLOGY, 2017, 37(6): 854-862.

98. Berger E R. RFSSW Behavior Prediction Using a Numerical Model[D]. Brigham Young University, 2023.

99. Zhao Yunqiang, Zhao Yujia, Liu Zhe, et al. High strength aluminum alloy variable speed backfill mixing friction point spot welding temperature field and joint tissue performance control [J]. Journal of Welding, 2022, 43 (06): 50-55 + 115-116.

100. Derlatka A, Lacki P. Experimental study and numerical simulation of cellular I-beam manufactured using refill friction stir spot welding technology[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 200: 111890.

101. Bhardwaj N, Narayanan R G, Dixit U S. Experimental and numerical investigation on the effect of rotational speed on exit-hole-free friction stir spot

welding with consumable pin[J]. International Journal of Material Forming, 2023, 16(5): 54.

102. Abd Al-Sahb W S, Hussein S G, Mohammed M N, et al. Numerical and Experimental Analyses of Developed Friction Stir Spot Welding (DFSSW) Based on Systematic Design Process Approach[J]. The Scientific World Journal, 2024, 2024(1): 8183490.

103. Rached S, Chaabene A, Chatti S. Enhancing Friction Stir Welding Performance: Finite Element Simulation Study using Filler Material[J]. Annals of “Dunarea de Jos” University of Galati. Fascicle XII, Welding Equipment and Technology, 2024, 35: 79-92.

104. Kubit, Andrzej, and Tomasz Trzepiecinski. "A fully coupled thermo-mechanical numerical modelling of the RFSSW process in Alclad 7075-T6 aluminium alloy sheets." Archives of Civil and Mechanical Engineering 20.4, 2020, 117.

105. Sato, Yutaka S., et al. "FIB-assisted TEM study of an oxide array in the root of a friction stir welded aluminium alloy." Scripta materialia 50.3, 2004, 365-369.

106. Salami K, Abdi Behnagh R, Agha Mohammad Pour M, et al. Numerical study of refill friction stir spot welding of dissimilar metallic materials using smoothed particle hydrodynamics (SPH)[J]. Acta Mechanica, 2024, 235(10): 6321-6339.

Додаток А

Список наукових публікацій за темою дисертації

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Xiaole Ge, Igor Kolupaev, Weiwei Song, Di Jiang, Jiafei Pu, Hongfeng Wang, Yuan Chu. Influence of the process parameters on the microhardness and the wear resistance of the friction stir processed h65 copper alloy, Journal of Engineering and Technological Sciences, 2022, 54(6), 1143-1159.
<https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.6.4> (Scopus)
2. Di Jiang, I. N. Kolupaev, HongFeng Wang & Xiaole Ge. Analysis of mechanical properties of 6010 aluminum alloy without Tool Tilt Angle friction stir welding[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2023,37(13), 2010-2024.
<https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2109254> (Scopus)
3. Di Jiang, I. N. Kolupaev, HongFeng Wang, Xiaole Ge & Liu Hui . Study on the Performance of FSW Joint Welded of Aluminum Alloy by S-Type Track [J], Integrated Ferroelectrics, 2023,234(1), 115-125.
<https://doi.org/10.1080/10584587.2023.2191556> (Scopus)
4. Xiaole Ge, I.N. Kolupaev, Di Jiang, Hongfeng Wang, Shouzhen Cao, Shengrong Liu. Effect of the tool rotation direction on the joint properties of the pinless friction stir spot welding of pure copper, Ferroelectrics, 2023, 615, 396-406.
<https://doi.org/10.1080/00150193.2023.2198948> (Web of Science)
5. Xiaole Ge, I.N. Kolupaev, Di Jiang, Hongfeng Wang. Investigation on the welded joint properties of pinless friction stir spot welding of copper under different tool grooves, Ferroelectrics, 2024, 618,15-16, 2339-2354. DOI:
<https://doi.org/10.1080/00150193.2024.2325888> (Web of science)
6. Di Jiang, Kolupaev, I.N, HongFeng, W., & Xiaole, G. (2025). Process optimization of refill friction spot stir of AA6061-T6 aluminum alloy for thick plate[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2025, 39, 4, p. 555 – 573.
<https://doi.org/10.1080/01694243.2024.2416048> (Scopus).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Di Jiang, Igor Kolupaev. Effect of Process Parameters on the Performance of Refill Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloys, XVIII INTERNATIONAL CONFERENCE FOR MASTER AND POSTGRADUATE STUDENTS “Theoretical and practical research of young scientists”, November 19-22, 2024.

8. Di Jiang, Igor Kolupaev. Numerical simulation analysis of refill friction stir spot welding based on DEFORM, XVII INTERNATIONAL CONFERENCE FOR MASTER AND POSTGRADUATE STUDENTS“ Theoretical and practical research of Young Scientists”, November 28-30, 2023.

9. Волков О.О., Субботіна В.В., Колупаєв І.М., Краєвська Ж.В., Jiang Di, Ge Xiaole. Вплив теплофізичних характеристик матеріалів на ефективність процесів з фрикційною складовою: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXI міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2023, 17–20 травня 2023 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. — Харків : НТУ «ХПІ». — 1406 с.

10. Subbotina V.V., Bilozerov V.V., Kolupaev I. N., Volkov O.O., Subbotin O.V., D. Jiang, Xiaole Ge Control of the magnitude and distribution of residual macro-stresses by roller rolling): Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXII міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2024, 22–25 травня 2024 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. — Харків: НТУ «ХПІ».

11. Волков О.О., Субботіна В.В., Колупаєв І.М., Краєвська Ж.В., Jiang Di, Ge Xiaole. Застосування тертя в якості високоенергетичного засобу зміни структурного стану матеріалів" Тез. доп. XXX Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я:— Харків: НТУ «ХПІ», 2022. – С. 222

12. Волков О.О., Субботіна В.В., Колупаєв І.М., Краєвська Ж.В., Jiang Di, Ge Xiaole. Технологічні принципи підвищення експлуатаційних властивостей деталей машин та елементів конструкцій при модифікуванні їх поверхневих шарів методами ТФЗ, МДО та при зварюванні тертям з перемішуванням. VII Всеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти та

молодих вчених «Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення і перспективи»

Луцьк, 2022 р.

Додаток Б

Акт впровадження результатів дисертації
в навчальний процес кафедри «Матеріалознавство»
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчальної роботи
НТУ «ХПІ»

Руслан МИГУЩЕНКО

« 15 » 06 2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Ді Цзян за темою «Вплив технологічних параметрів зварювання тертям на
механічні властивості з'єднань матеріалів на основі алюмінію»
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»

Комісія у складі: доцента кафедри «Матеріалознавство», к. т. н., доцента, Волкова О.О. (голова комісії), доцента кафедри «Матеріалознавство», к. ф.-м. н., доцента, Терлецького О.С., доцента кафедри «Матеріалознавство», PhD, Князевої Г.О., склала цей акт про те, що результати науково-дослідної дисертаційної роботи Ді Цзян за темою: «Вплив технологічних параметрів зварювання тертям на механічні властивості з'єднань матеріалів на основі алюмінію» впроваджені в навчальний процес кафедри «Матеріалознавство» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» і використовуються при читанні лекцій, проведенні лабораторних та практичних занять з освітніх компонентів: «Кольорові метали і сплави», «Основи міцності матеріалів», «Технології та обладнання для модифікування поверхні, об'ємної обробки, комп'ютерного інженерного дизайну металів», «Матеріалознавство нерознімних з'єднань та їх діагностика».

Голова комісії

Олег ВОЛКОВ

Члени комісії:

Олександр ТЕРЛЕЦЬКИЙ

Ганна КНЯЗЄВА

Позначення

ТЗТЗП (RFSSW) - Точкове зварювання тертям з перемішуванням із заповненням

ЗТВ (TMAZ) - зона термомеханічного впливу

ЗВГ (SAZ) - зону впливу гільзи

ЗВШ (PAZ) - зона впливу стрижня

СЗР (TSFL) - рівень зсувного розтягування

ТВ (TAZ) – термічний вплив

ЗП (NZ) -зона перемішування

ЗЛЗ (JRL) (Joint Residual Line) - це залишкова лінія з'єднання. Вона являє собою слід межі між матеріалами, що зварюються, який залишається всередині зварного шва після процесу ТЗТЗП.