

Міністерство освіти і науки України
Запорізький національний технічний університет

Кваліфікаційна наукова робота
на правах рукопису

КАПУСТЯН ОЛЕКСІЙ ЄВГЕНОВИЧ

 УДК: 669.295: 621.762

**ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ І СЛУЖБОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СПЕЧЕНОГО КОНСТРУКЦІЙНОГО ТИТАНУ**

05.02.01 - Матеріалознавство

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

*Примірник за змістом ідентичний з
іншими*

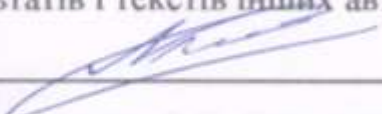
*Учений секретар спеціалізованої
ради Д17.052.01*



О.А.Мітєд

Запоріжжя - 2018

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


_____ О. Є. Капустян

Науковий керівник Овчинников Олександр Володимирович,

доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Капустян О.Є. Підвищення механічних і службових властивостей зварних з'єднань спеченого конструкційного титану. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство.

Робота виконана в Запорізькому національному технічному університеті МОН України, Запоріжжя, 2018.

Зміст дисертації. Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-практичної задачі – підвищенню механічних і службових властивостей зварних з'єднань спечених титанових виробів складної конфігурації, які працюють в агресивних середовищах.

Проведено аналітичний огляд з питань основних властивостей титану і вимог до титанових сплавів, які використовуються в хімічній промисловості. Показано, що для виробів, які працюють в агресивних середовищах, слід віддати перевагу титану типу VT1-0.

Проведено аналіз переваг і недоліків технологій виготовлення деталей із титану. Доведено, що деталі складної конфігурації для металургійної та хімічної промисловості доцільно отримувати методом порошкової металургії із застосуванням зварювання. З метою максимального спрощення і здешевлення технології виробництва заготовок з порошків титану при задовільних показниках механічних властивостей необхідно визначення оптимальних параметрів. Виявлено ряд завдань, вирішення яких дозволить отримувати спечені титанові вироби при зниженні загальної собівартості: визначення впливу тиску пресування і фракційного складу порошків магнієтермічного способу виробництва на структуру титанових сплавів.

Проведено аналіз методів зварювання та їх впливу на матеріал деталей. Показано, що найбільш перспективними серед методів зварювання порошкових

виробів з титану можуть бути: стикове зварювання оплавленням, конвекційне зварювання тертям, зварювання тертям перемішуванням. Огляд сучасних публікацій стану цього питання дозволив встановити, що найбільш поширені дані стосуються зварювання тертям деталей з однофазних титанових сплавів, отриманих методами лиття та обробки тиском. Структура та властивості сплавів, що отримані методом порошкової металургії, багато в чому залежать від технології виробництва, а саме від тиску при пресуванні, фракції порошку, технології зварювання та ін. Це вимагає проведення досліджень, щодо впливу пористості спеченого титану на зварюваність та якість зварних з'єднань.

Розглянуто особливості корозії зварних з'єднань спеченого титану. Показано, що для оцінки можливості застосування зварних з'єднань спечених титанових сплавів в металургійній, хімічній промисловості необхідно провести дослідження на предмет впливу структурної неоднорідності на електрохімічні характеристики матеріалів і на загальну корозійну стійкість в розчинах мінеральних кислот. Тому визначення електрохімічних характеристик різних зон зварних з'єднань, а також визначення загальної корозійної стійкості зварних з'єднань спеченого титану є важливим завданням.

Досліджено вплив фракційного складу ($-0,8+0,1$ мм) порошоків титану ПТ (ТУ У 14-10-026-98) і тиску пресування (від 500 МПа до 900 МПа) на структуру, пористість і механічні властивості спечених заготовок, відповідних за хімічним складом технічному титану ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91). Отримано графічні залежності границі міцності, відносного подовження, твердості, об'ємної частки і розміру пор від фракційного складу і тиску пресування. Методом математичного планування експерименту вивчено вплив величини фракцій порошку і тиску пресування на об'ємну частку пор, їх розмір і механічні властивості титанових заготовок. Отримані залежності дозволяють прогнозувати величину пористості і рівень механічних властивостей титанових порошкових виробів в залежності від технологічних факторів виробництва. Встановлено, що збільшення тиску пресування і зниження фракції порошку призводить до підвищення міцності, твердості і зниження об'ємної частки і розміру пор. Встановлено, що фракція

порошку менше 0,55 мм забезпечує отримання пористості не більше 7 % із розміром пор до 62 мкм: $\sigma_b \geq 345$ МПа, $HB > 130$, $\delta = 7...8$ %, $\psi = 14,2...19,1$ %, $KCU = 87,8...108,3$ Дж/см².

Виконано порівняльний аналіз впливу трьох видів зварювання: стикового оплавленням, конвекційним тертям і тертям перемішуванням на якість зварного з'єднання спечених порошкових заготовок. Розширено уявлення про розподіл газових домішок азоту і кисню в структурних складових зварних з'єднань спеченого титану при зварюванні контактним стиковим оплавленням та конвекційному тертям в повітряній атмосфері та встановлено, що при зварюванні на технологічних режимах не відбувається газонасичення металу шва і колошовної зони більше основного металу. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено мікрорентгеноспектральним енергодисперсійним якісним та кількісним аналізами, що в означених видах зварювання, завдяки витисканню металу в ґрат, не відбувається насичення зварного з'єднання газовими домішками, що дозволило отримати зварні з'єднання складу на рівні основного металу: $O_2 \leq 0,18$ %, $N_2 \leq 0,035$ %. Встановлено закономірності формування структури з'єднань спеченого титану, які полягали в позитивному впливі означених способів зварювання на структуру зварного шва та зони термомеханічного впливу, а саме зменшення розміру та кількості пор. У зварних швах об'ємна частка залишкових пор складала 0,5...1,0 %, а їх розмір не перевищував 3 мкм, в зоні термомеханічного впливу – 1...5 % та 10...20 мкм, в основному металі – до 15 % та 62 мкм відповідно, що пояснюється механізмом «заліковування» пор. Встановлено вплив структури на механічні властивості зварних з'єднань спечених матеріалів. Показано, що рівень механічних властивостей зварних з'єднань спеченого титану порівняний з основним металом. При стиковому зварюванні оплавленням і конвекційному тертям міцність в місці стику ($\sigma_b = 409...460$ МПа) перевищує міцність основного металу, при зварюванні тертям перемішуванням, навпаки міцність зварного шву менше міцності основного металу ($\sigma_b = 222...240$ МПа проти $\sigma_b = 345...400$ МПа).

Проведено дослідження впливу структури зварних з'єднань, отриманих

конвекційним зварюванням тертям на оптимальних режимах, на електрохімічну і загальну корозійну стійкість. Корозійні характеристики у водних розчинах хлоридної та сульфатної кислот корелюють зі структурними характеристиками різних зон зварного з'єднання спеченого титану. Встановлено вплив структури зварних з'єднань порошкового титану, що отримані конвекційним зварюванням тертям, на опір корозійним процесам у водних розчинах неорганічних кислот. Потенціал корозії зони зварного шву в порівнянні з потенціалом корозії основного металу має більш позитивні значення (- 0,270 В проти - 0,365 В і - 0,196 В проти - 0,416 В), а щільність струму корозії знижується ($0,162 \text{ А/м}^2$ проти $0,207 \text{ А/м}^2$ і $0,77 \text{ А/м}^2$ проти $0,151 \text{ А/м}^2$) відповідно у 20 % хлоридній і 40 % сульфатній кислотах, завдяки формуванню однорідної структури і суттєвому підвищенню густини зварного шву. З огляду на те, що конвекційне зварювання тертям задовольняє вимоги рівностійкості зон зварного з'єднання, воно може використовуватися для отримання виробів зі спеченого технічного титану, які будуть працювати в агресивних середовищах.

В цілому результати досліджень дозволили встановити, що конвекційне зварювання тертям є найбільш перспективним при виготовленні виробів з титану, які працюють в умовах незначних механічних навантажень і агресивних середовищ.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в ДП «ДНДП Інститут титану» та на трьох промислових підприємствах м. Запоріжжя – ТОВ «Авіа-Січ», ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» і ДП «Кремнійполімер» з очікуваним річним економічним ефектом 217000 грн. За розробленою технологічною схемою методом порошкової металургії і конвекційного зварювання тертям виготовлено дискові та кульові крани, деталі насосів і пруткові заготовки діаметром до 38 мм і довжиною до 700 мм. Також результати впроваджено в навчальний процес на кафедрі обладнання і технології зварювального виробництва ЗНТУ, в лекційних курсах, при виконанні студентами лабораторних, практичних, курсових та магістерських робіт. Розроблена в дисертаційній роботі ресурсозберігаюча технологічна схема дозволяє: розширити використання

порошкового титану виробництва ДП «Державного науково-дослідного і проектного інституту титану», ДП «Запорізького металургійного дослідно-промислового заводу», виготовлених з губчатого титану виробництва ТОВ «Запорізького титано-магнієвого комбінату»; знизити вартість виготовлення деталей; підвищити надійність і довговічність обладнання.

Ключові слова: порошкова металургія, титанові сплави, зварні з'єднання, структура, механічні властивості, корозійна стійкість.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті без співавторів у наукових фахових виданнях України

1. Капустян А. Е. Получение длинномерных полуфабрикатов из спеченных титановых сплавов сваркой трением. *Автоматическая сварка*. 2015. № 3–4. С. 55–59.

Статті у виданнях з індексом цитування

2. Капустян О. Є., Овчинников О. В., Янко Т. Б. Спечені титанові сплави для ядерної енергетики. *Питання атомної науки і техніки*. Серія «Вакуум, чисті матеріали, надпровідники». 2018. № 1 (113). С. 134–141. [НБД Scopus, Web of Science].

3. Овчинников А. В., Капустян А. Е., Давыдов С. И., Павлов В. В. Ресурсосберегающая технология получения длинномерных полуфабрикатов из титановых сплавов методом порошковой металлургии. *Технологические системы*. 2013. № 4 (65). С. 29–33. [НБД Open Academic Journals Index, Index Copernicus, Scientific Indexing Services, International Institute of Organized Research (I2OR), CiteFactor, Eurasian Scientific Journal Index, General Impact Factor, Directory of Indexing and Impact Factor, International Innovative Journal Impact Factor, ResearchBib, eLIBRARY].

Статті у наукових фахових виданнях України

4. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Павлов В. В., Шульга К. С. Интегрированная технология получения полуфабрикатов из титановых сплавов на основе методов порошковой металлургии и сварки. *Нові матеріали і технології в*

металургії та машинобудуванні. 2014. № 2. С. 93–95. [НБД Ulrich's Periodical Directory, ВІНІТІ].

5. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Вакуленко И. А. Получение сварных изделий из спеченных титановых сплавов. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2014. № 3 (51). С. 84–91. [НБД Index Copernicus, Google Scholar, Global Impact Factor, InfoBase Index].

6. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Коваленко Т. А., Шевченко А. В. Получение полуфабрикатов титановых сплавов для авиационно-космической техники. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2016. № 7 (134). С. 107–116. [НБД eLIBRARY; Index Copernicus; CiteFactor; AcademicKeys; Infobase Index; WordCat; Google Scholar]

7. Скребцов А. А., Овчинников А. В., Капустян А. Е. Исследование механических свойств сварных соединений спеченных титановых сплавов. *Вісник СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія: Збірник наук. праць*. Севастополь: СевНТУ, 2012. Випуск 132. С. 14–17. [НБД РИНЦ, eLIBRARY, Ulrich's Periodicals Directory, ВІНІТІ РАН]

8. Скребцов А. А., Овчинников А. В., Капустян А. Е., Быков И. О., Селиверстов А. Г. Исследование структуры сварных соединений спеченных титановых сплавов. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов*. Дн-вск: ПГАСА, 2012. Вып. 64, С. 403–408.

9. Скребцов А. А., Овчинников А. В., Шевченко В. Г., Капустян А. Е., Джуган А. А. Влияние содержания гидрированного титана в смеси порошков на механические свойства спеченного сплава ВТ1-0. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов*. Дн-вск: ПГАСА, 2014. Вып. 73, ч. 4. С. 89–94.

10. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Павлов В. В., Шульга К. С., Шевченко В. Г. Влияние режимов прессования и спекания на пористость спеченных титановых изделий. *Обработка материалов давлением: Сб. науч. трудов*. Краматорск: ДГМА, 2015. № 2 (41). С. 221–225.

Патент на корисну модель

11. Гідрид титану губчастого, легований киснем / С. Б. Беліков, С. І. Давидов, О. М. Івасишин, О. В. Овчинников, В. Г. Шевченко, О. В. Осипенко, О. Є. Капустян, І. О. Биков, Д. Г. Саввакін: пат. 74771 Україна, МПК (2012.01) C01B 6/00. заявл. 23.04.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. №21. 4 с.

Тези в матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій

12. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Осипенко А. В. Ресурсосберегающая технология получения полуфабрикатов из титановых сплавов серии low-cost. *Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок: Тезисы докладов X Международной научно-технической конференции* (Алушта, 23–28 сентября 2013). Запорожье: АО «Мотор Сич», 2013. С. 10–12.

13. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Коваленко Т. А., Шевченко А. В. Получение полуфабрикатов титановых сплавов для авиационно-космической техники. *XX Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей*. (Коблево, 5–10 вересня, 2016). Харків: Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», 2016. С. 83.

14. Капустян О. Є., Акритова Т. О., Савонов Ю. М. Отримання довгомірних пруткових заготовок з титану методами порошкової металургії. *Титан–2016: виробництво та використання в авіабудуванні: Збірник тез доповідей IV Міжнар. наук.-практ. конф.* (Запоріжжя, 3–4 листопада 2016). Запоріжжя: АТ «Мотор Січ», 2016. С. 52–54.

15. Сушчінський О. Д., Овчинников О. В.; Капустян О. Є., Янко Т. Б., Акритова Т. О. Спечені титанові сплави для ядерної енергетики. *Высокочистые материалы: получение применение, свойства: Матеріали доповідей 4-ї Міжнародної конференції* (Харків, 12–15 вересня 2017). Харків: ННЦ ХФТИ, 2017. С. 87.

16. Акритова Т. О., Овчинников О. В., Капустян О. Є. О необхідності дослідження корозійної тривкості зварних швів спеченого титану. *Людина і Космос: Тези доп. XX Міжнар. молодіжної наук.-практ. конф.* (Дніпро,

11-13 квітня 2018). Дніпро, 2018. С. 235.

17. Капустян О.Є., Ніколаєв В.М., Овчинников О.В. Розширення сфери застосування титанових сплавів. *Титан 2018: виробництво та використання в Україні: Збірник доп. міжнар. конф.* / Під ред. проф. С.В. Ахоніна. (Київ, 11–13 червня 2018). К.: ТОВ «ДИА», 2018. С. 71–73.

ABSTRACT

Kapustian O. Ye. Increase of mechanical and service properties of welded joints of sintered structural titanium. – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.02.01 – Material science.

The work has been carried out at the Zaporizhya National Technical University, Zaporizhya, 2018.

The content of the dissertation. The dissertation is devoted to solving an important scientific and practical task - to increase the mechanical and service properties of welded joints of sintered titanium products of complex configuration, which operate in aggressive environments.

An analytical review was carried out on the main properties of titanium and the requirements for titanium alloys used in the chemical industry. It is shown that for products that work in aggressive media, it should be preferred titanium type VT1-0.

The analysis of the advantages and disadvantages of technology for the production of titanium components is carried out. It is proved that the details of the complex configuration for the metallurgical and chemical industries are expedient to be obtained by the use of powder metallurgy with the use of welding. In order to maximize the simplification and cheapening of the production technology of billets from titanium powders with satisfactory mechanical properties, it is necessary to determine the optimal parameters. A number of problems are revealed, the solution of which will

allow to receive sintered titanium products at decrease of the total cost: the determination of the influence of pressing pressure and the fractional composition of powders magnesium thermal production method on the structure of titanium alloys.

The analysis of welding methods and their influence on the material of details was carried out. It is shown that the most promising methods for welding of titanium powder products may be: fusion welding joints, convection welded friction, friction welding by mixing. An overview of the current publications on this issue has made it possible to establish that the most common data relate to friction welding of single-phase titanium alloys obtained by injection molding and pressure treatment. The structure and properties of the alloys obtained by the powder metallurgy process depend to a large extent on the production technology, namely pressure on pressing, powder fraction, welding technology, etc. This requires research on the effect of porosity of sintered titanium on the weldability and quality of welded joints.

Features of corrosion of welded joints of sintered titanium are considered. It is shown that in order to evaluate the possibility of using welded joints of sintered titanium alloys in the metallurgical, chemical industry, it is necessary to conduct a study on the subject of the influence of structural inhomogeneity on the electrochemical characteristics of materials and on the general corrosion resistance in solutions of mineral acids. Therefore, the determination of the electrochemical characteristics of different zones of welded joints, as well as the determination of the general corrosion resistance of welded joints of sintered titanium, is an important task.

The influence of the fractional composition ($-0,8+0,1$ mm) of PT titanium powders (TU U 14-10-026-98) and pressure of pressing (from 500 MPa to 900 MPa) on the structure, porosity and mechanical properties of sintered billets corresponding to on the chemical composition of technical titanium VT1-0 (GOST 19807-91). The graphic dependences of the boundary of strength, relative elongation, hardness, volume particle and pore size from fraction composition and pressure of pressing are obtained. The method of mathematical planning of the experiment was to study the influence of the size of the powder fractions and the pressure of pressing on the volume fraction of pores, their size and mechanical properties of titanium blanks. The obtained

dependencies allow to predict the amount of porosity and the level of mechanical properties of titanium powder products, depending on the technological factors of production. It was established that increasing the pressure of pressing and reducing the fraction of the powder leads to increased strength, hardness and lower volume particle and pore size. It has been established that the powder fraction of less than 0,55 mm ensures that the porosity is not more than 7 % with a pore size of 62 μm : $\sigma_B \geq 345 \text{ MPa}$, $\text{HB} > 130$, $\delta = 7... 8 \%$, $\psi = 14,2...19,1 \%$, $\text{KSU} = 87,8...108,3 \text{ J / cm}^2$.

A comparative analysis of the influence of three types of welding: joint molding, convection friction and friction by mixing on the quality of welded joints of sintered powder blanks has been made. The idea of the distribution of gas admixtures of nitrogen and oxygen in the structural components of the welded joints of sintered titanium by welding by contact static melting and convection friction in the air atmosphere has been expanded and it has been established that during welding at technological regimes there is no gas-saturation of the metal of the seam and joint area over the base metal. It is theoretically substantiated and experimentally proved by microrentgenospectral energy dissipation of qualitative and quantitative analyzes that, due to the extrusion of metal in the lattice, there is no saturation of the welded connection with gas admixtures in the specified types of welding, which made it possible to obtain welded joints of the composition at the level of the base metal: $\text{O}_2 \leq 0,18 \%$, $\text{N}_2 \leq 0,035 \%$. The laws governing the formation of the structure of sintered titanium compounds have been established, which consisted in the positive influence of these welding methods on the structure of the weld and the zone of thermomechanical impact, namely, the reduction in the size and number of pores. In the welds, the volume fraction of residual pores was 0,5...1,0 %, and their size did not exceed 3 μm , in the zone of thermomechanical influence - 1...5 % and 10...20 μm , in the main metal - up to 15 % and 62 μm respectively, which is explained by the mechanism of "healing" pores. The influence of structure on mechanical properties of welded joints of sintered materials is established. It is shown that the level of mechanical properties of welded joints of sintered titanium is compared with the main metal. At bridged welding by fusion and convection friction, the strength at the junction ($\sigma_B = 409...460 \text{ MPa}$) exceeds the strength of the base metal,

when welded by friction by mixing, on the contrary, the strength of the weld is less than the strength of the base metal ($\sigma_B = 222...240$ MPa vs $\sigma_B = 345...400$ MPa).

The investigation of the influence of the structure of welded joints obtained by convection welded friction on optimal regimes, on electrochemical and general corrosion resistance was carried out. Corrosive characteristics in aqueous solutions of chloride and sulfate acids correlate with the structural characteristics of different zones of welded sintered titanium compounds. The influence of the structure of welded titanium powder compounds obtained by convection friction welding on resistance to corrosion processes in aqueous solutions of inorganic acids was established. The potential of corrosion of the weld zone compared with the corrosion potential of the base metal has a more positive value (- 0,270 V against - 0,365 V and - 0,196 V against - 0,416 V), and the current density of corrosion is reduced (0,162 A / m² against 0,207 A / m² and 0,77 A / m² against 0,151 A / m²) respectively in 20 % chloride and 40 % sulfate acids, due to the formation of a homogeneous structure and a significant increase in the density of the weld seam. In view of the fact that convection friction welding satisfies the requirements of the uniformity of welded zones, it can be used to obtain products from sintered technical titanium that will work in aggressive environments.

In general, the results of research allowed to establish that convection friction welding is the most promising in the manufacture of products made of titanium, working under conditions of insignificant mechanical loads and aggressive media.

The results of the dissertation work were introduced at the State Enterprise «DNDP Institute of Titanium» and at three industrial enterprises of Zaporozhye – «Avia-Sich» LLC, «Zaporizhzhya Titanium Magnesium Plant» LLC and SE «Kremniypolimer» with an expected annual economic effect of 217000 UAH. According to the developed technological scheme by the method of powder metallurgy and convection friction welding, disc and ball valves, pump parts and rod blanks with a diameter of up to 38 mm and a length of up to 700 mm were manufactured. Also, the results are implemented in the educational process at the department of equipment and technology of welding production ZNTU, in lecture courses, when students perform

laboratory, practical, course and master's works. The resource-saving technological scheme developed in the dissertation allows us to: expand the use of powder titanium produced by the state enterprise «State Research and Design Institute of Titanium», state enterprise «Zaporizhzhya Metallurgical Research and Industrial Plant» made of sponge titanium produced by LLC «Zaporizhzhya Titanium Magnesium Combine»; reduce the cost of manufacturing parts; increase reliability and durability of equipment.

Keywords: powder metallurgy, titanium alloys, weld joints, mechanical properties, structure, corrosion resistance

PUBLICATIONS BY THE SUBJECT OF DISSERTATION

Articles without co-authors in scientific professional journals of Ukraine

1. Kapustian O. Ye. Production of long-time semifinished products from sintered titanium alloys by friction welding. Automatic welding. 2015. No. 3–4. pp. 55–59.

Articles in journals with citation index

2. Kapustian O. Ye., Ovchynnykov O. V., Yanko T.B. Sintered titanium alloys for nuclear power engineering. Questions of atomic science and technology. Series «Vacuum, clean materials, superconductors». 2018. No. 1 (113). pp. 134–141. [Scopus, Web of Science].

3. Ovchynnykov O.V., Kapustian O. Ye., Davydov S. I., Pavlov V. V. Resource-saving technology for the production of long-time semifinished products made of titanium alloys by powder metallurgy. Technological systems. 2013. No. 4 (65). pp. 29–33. [NDD Open Academic Journals Index, Index Copernicus, Scientific Indexing Services, International Institute of Organized Research (I2OR), CiteFactor, Eurasian Scientific Journal Index, General Impact Factor, Directory of Indexing and Impact Factor, International Innovative Journal Impact Factor, ResearchBib, eLIBRARY]

Articles in scientific professional journals of Ukraine

4. Kapustian O. Ye., Ovchynnykov O.V., Pavlov V. V., Shulga K. S. Integrated technology of production of semi-finished products from titanium alloys on the basis of powder metallurgy and welding methods. New materials and technologies in metallurgy and machine building. 2014. No. 2. pp. 93–95. [Ulrich's Periodical Directory, VINITI].

5. Kapustian O. Ye., Ovchynnykov O.V., Vakulenko I. A. Preparation of welded products of sintered titanium alloys. Science and progress of transport. Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. 2014. No. 3 (51). pp. 84–91. [NDS Index Copernicus, Google Ssholar, Global Impact Factor, InfoBase Index].

6. Kapustian O. Ye., Ovchynnykov O.V., Kovalenko T. A., Shevchenko A. V. Preparation of semifinished products of titanium alloys for aviation-space technology. Aerospace technology and technology. 2016. No. 7 (134). pp. 107–116. [NBD eLIBRARY; Index Copernicus; CiteFactor; AcademicKeys; Infobase Index; WordCat; Google Scholar]

7. Skrebtsov A.A., Ovchynnykov O.V., Kapustian O. Ye. Investigation of mechanical properties of welded joints of sintered titanium alloys. Visnyk SevNTU. Series: Mechanics, Energy, Ecology: Collection of Sciences. works. Sevastopol: SevNTU, 2012. Issue 132. pp. 14–17. [NDD RINTS, eLIBRARY, Ulrich's Periodicals Directory, VINITI RAN]

8. Skrebtsov A.A., Ovchynnykov O.V., Kapustian O. Ye., Bykov I. O., Seliverstov A. G. Investigation of the structure of welded joints of sintered titanium alloys. Construction, Materials Science, Mechanical Engineering: Sb. scientific of labor. Dnipropetrovsk: PGASA, 2012. Issue. 64. pp. 403–408.

9. Skrabtsov AA, Ovchynnykov O.V., Shevchenko V.G., Kapustian O. Ye., Dzhugan A.A. Influence of the content of hydrogenated titanium in the mixture of powders on the mechanical properties of the sintered alloy VT1-0. Construction, Materials Science, Mechanical Engineering: Sb. scientific of labor. Dnipropetrovsk: PGASA, 2014. Issue. 73, part 4. pp. 89–94.

10. Kapustian O. Ye., Ovchynnykov O.V., Pavlov VV, Shulga KS, Shevchenko VG Influence of compression and sintering modes on porosity of sintered titanium articles. Treatment of materials by pressure: Sat. scientific of labor. Kramatorsk: DSMA, 2015. No. 2 (41). pp. 221–225.

Patent for utility model

11. Sponge doped titanium hydride, doped with oxygen / S. B. Belikov, S. I. Davydov, A. M. Ivasyshin, O.V. Ovchynnykov, V. G. Shevchenko,

A. V. Osipenko, O. Ye. Kapustian, I.O. Bykov, D.G. Savvakin: pat. 74771 Ukraine, IPC (2012.01) C01B 6/00. stated. April 23, 2012; has published 12.11.2012, No. 21. 4 p.

Abstracts of National and International Conferences

12. Kapustian O. Ye., Ovchynnykov O.V., Osipenko AV Resource-saving technology for the production of semifinished products from titanium alloys of the low-cost series. Progressive Technologies of the Life Cycle of Aviation Engines and Power Plants: Abstracts of the reports of the Xth International Scientific and Technical Conference (Alushta, September 23–28, 2013). Zaporozhye: Motor Sich JSC, 2013. pp. 10–12.

13. Kapustian O. Ye., Ovchynnykov O.V., Kovalenko T. A., Shevchenko A. V. Preparation of semifinished products of titanium alloys for aviation-space technology. XX International Engineers Congress: Abstracts. (Koblevo, September 5–10, 2016). Kharkiv: National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", 2016. pp. 83.

14. Kapustian O. Ye., Akritova T. O., Savonov Yu. M. Obtaining long-length billet billets with titanium by powder metallurgy. Titanium–2016: Production and use in aircraft construction: A collection of abstracts IV International science-practice conf. (Zaporozhye, November 3–4, 2016). Zaporozhye: Motor Sich JSC, 2016. pp. 52–54.

15. Sushchinsky O. D., Ovchynnykov O.V., Kapustian O. Ye., Yanko T. B., Akritova T. O. Sintered titanium alloys for nuclear power engineering. High-purity materials: obtaining application, properties: Materials of the reports of the 4th International Conference (Kharkiv, September 12–15, 2017). Kharkiv: NSC KhPTI, 2017. pp. 87.

16. Akritova T. O., Ovchynnykov O.V., Kapustian O. Ye. On the necessity of study of corrosion durability of welded seams of sintered titanium. Man and Space: Abstracts of addition. XX International youth science.-practice. conf. (Dnipro, April 11–13, 2018). Dnepr, 2018. pp. 235.

17. Kapustian O.Ye., Nikolayev V.M., Ovchynnykov O.V. Expansion of the scope of titanium alloys. Titan 2018: Production and Usage in Ukraine: Collection of additional. international conf. / Ed. prof. S.V. Akhonina (Kyiv, June 11–13, 2018). K .: LLC "DIA", 2018. pp. 71–73.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів.....	20
Вступ.....	21
Розділ 1 Титан, порошкова металургія, зварювання.....	29
1.1 Властивості титану.....	29
1.2 Аналіз методів виготовлення виробів з титану і його сплавів.....	32
1.3 Зварювання титану і його сплавів.....	41
1.3.1 Основні властивості й зварюваність титану.....	41
1.3.2 Зварювання плавленням (термічне).....	43
1.3.3 Термомеханічне зварювання.....	46
1.3.4 Механічне зварювання.....	47
1.4 Особливості корозії зварних з'єднань спеченого титану.....	50
1.5 Постановка цілі і задач досліджень.....	54
Розділ 2 Матеріали і методи досліджень.....	56
2.1 Матеріали і структурно-логічна схема роботи.....	56
2.2 Виготовлення спечених зразків.....	58
2.3 Визначення хімічного складу спечених заготовок.....	59
2.4 Виготовлення зварних зразків.....	60
2.4.1 Контактне стикове зварювання оплавленням.....	60
2.4.2 Зварювання тертям конвекційне.....	60
2.4.3 Зварювання тертям перемішуванням.....	62
2.5 Дослідження структури.....	62
2.6 Фрактографічний аналіз поверхні руйнування.....	62
2.7 Кількісна оцінка мікроструктури.....	63
2.8 Оцінка пористості і усадки.....	63
2.9 Механічні властивості.....	64
2.10 Корозійна стійкість і електрохімічні властивості.....	65
2.11 Обробка експериментальних даних.....	66

Розділ 3 Дослідження і оптимізація технології отримання порошкових виробів з титану.....	67
3.1 Технологія виготовлення зразків.....	67
3.2 Аналіз впливу фракції порошку і тиску пресування на структуру спечених зразків.....	72
3.3 Механічні властивості спечених зразків.....	85
3.4 Матриця планування експерименту.....	100
3.5 Реалізація матриці планування.....	101
3.6 Графічний аналіз рівнянь регресійних залежностей і оптимізація технології отримання порошкових виробів з титану.....	105
3.7 Висновки до розділу 3.....	108
Розділ 4 Вплив способів зварювання на хімічний склад, механічні та службові властивості спеченого титану.....	110
4.1 Зварювання спеченого титану.....	112
4.1.1 Стикове зварювання оплавленням.....	112
4.1.2 Конвекційне зварювання тертям.....	116
4.1.3 Зварювання тертям перемішуванням.....	123
4.2 Вплив структури на корозійну стійкість зварних з'єднань титану, отриманих зварюванням тертям.....	129
4.3 Висновки до розділу 4.....	140
Розділ 5 Промислова апробація і впровадження результатів роботи.....	143
5.1 Мета і задачі промислових випробувань.....	143
5.2 Виготовлення корпусів кранів методами порошкової металургії і зварювання.....	144
5.3 Виготовлення деталей насосів та заготовок.....	148
5.4 Висновки до розділу 5.....	151
Висновки.....	153
Перелік використаних джерел.....	156
Додаток А.....	182
Додаток Б.....	184

Додаток В.....	187
Додаток Г.....	189
Додаток Д.....	191
Додаток Е.....	193
Додаток Ж Перелік опублікованих робіт за темою дисертації.....	195
Додаток И Відомості про апробацію результатів дисертації.....	198

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ПМ – порошкова металургія;

КВМ – коефіцієнт використання матеріалу;

ЗТВ – зона термічного впливу;

ЗТМВ – зона термомеханічного впливу;

ОМ – основний метал;

ЗШ – зварний шов;

РЕМ – растровий електронний мікроскоп;

ПТ – порошок титану (термомеханічний);

ОМТ – обробка металу тиском;

ЗТП – зварювання тертям перемішуванням.

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогоднішній день в Україні титан та сплави на його основі як конструкційні матеріали знаходять широке застосування в хімічній, нафтовій, авіаційній та інших галузях промисловості [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. У хімічній промисловості застосування титану забезпечує істотне підвищення ресурсу обладнання завдяки поєднанню високої міцності й корозійної стійкості.

Основний об'єм титану та його сплавів виробляється з титану губчатого, який отримують магнієтермічним способом. За традиційними технологіями для отримання зливків титану потрібної чистоти з титану губчастого виготовляють брикети, витратні електроди та здійснюють їх переплав (іноді подвійний чи потрійний) у вакуумних дугових і електронно-променевих печах. Отримані такими методами зливки титану діаметром 350...500 мм та вагою до 10 т використовують для подальшого виробництва різного типу продукції методами обробки металів тиском (ОМТ) та лиття [9, 10, 11].

Частина титанової губки піддається подрібненню з метою виробництва порошків для потреб порошкової металургії (ПМ). Дослідження Гегузін Я.Є., Гича Г.А., Івасишина О.М., Дрозденка В.А., Кипарисова С.С., Коржова В.П., Олесова Ю.Г., Павлова В.А., Павлова В.В., Устинова В.С., Amigo V., Eriksson M., Hadeo N., Simchi A. та ін. показали, що методи ПМ не потребують витратних, технічно складних вакуумних переплавів, а також дорогої деформаційної обробки отриманих пресовок та забезпечують коефіцієнт використання матеріалу (КВМ) до 0,96 в порівнянні з 0,20...0,75 для технологій, що традиційно застосовуються. За рівнем механічних і службових властивостей виготовлені методом ПМ вироби близькі до властивостей литих виробів та несуттєво поступаються деформованим [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21].

Однак виготовлення виробів складної геометричної форми та значних розмірів потребує складної за конструкцією пресової оснастки і потужного обладнання. Розв'язання зазначеної задачі може полягати в розробці комплексної

технології, яка об'єднує процеси порошкової металургії та зварювання.

Одним з найбільш ефективних і поширених способів з'єднання титанових сплавів є зварювання [22]. Тому проблема отримання виробів складної геометричної форми із спеченого титану може бути вирішена шляхом застосування прогресивних технологій зварювального виробництва. Згідно робіт Гуревича С.М., Зяхора І.В., Хорева А.І. та ін. правильний вибір способу зварювання обумовлює якість та ефективність виконання зварного з'єднання, що впливає на обсяг промислового застосування титану [23, 24, 25, 26, 27]. Одним з основних вимог до сучасних конструкцій з титанових сплавів є забезпечення співвідношення міцності шву до міцності основного металу не нижче 0,9 [26]. Цій вимозі відповідають електронно-променеве, лазерне, плазмове і спеціальні способи аргонового зварювання [28, 29, 30, 31, 32, 33]. Однак, ці способи мають ряд недоліків, притаманних усім методам зварювання в рідкій фазі, а саме: висока температура нагрівання металу, яка призводить до зростання зерен, структурних змін, і як наслідок, до зниження міцності зварних з'єднань. Крім того, всі ці способи реалізуються в захисному середовищі, що ускладнює технологію зварювання і здорожує вартість виробів. Методи зварювання тиском дозволяють реалізувати процес з'єднання за кілька секунд без захисного середовища, а також виключити плавлення основного металу і зберегти механохімічні показники металу шву близькі до основного металу [34].

Відомо, що низьколеговані титанові сплави мають гарну зварюваність [23]. Однак, пори в структурі спечених заготовок можуть негативно впливати на процес зварювання і механічні властивості зварних з'єднань [35, 36]. Це вимагає проведення досліджень впливу структурних складових спечених титанових сплавів на зварюваність і забезпечення якості зварних з'єднань (механічних, технологічних і службових властивостей) спечених матеріалів з титану.

У зв'язку з цим в даній роботі пропонується комплексна технологія «порошкова металургія - зварювання», що передбачає виробництво методами порошкової методами порівняно простих елементів з подальшим їх зварюванням і отриманням готових виробів складних форм з титану. Це потребує вирішення

матеріалознавчих задач, проведення ряду досліджень, спрямованих на формування структури, що забезпечує необхідний рівень механічних і службових властивостей виробів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні етапи дисертаційної роботи виконані відповідно з планами науково-дослідних робіт Запорізького національного технічного університету (ЗНТУ) за темами:

– ДБ 01115 «Розробка та дослідження ресурсозберігаючих технологій виготовлення відповідальних деталей авіаційних двигунів із титанових сплавів» (№ держреєстрації 0115U002239, 2015-2016 рр.);

– Г/Д № 2115 «Розробка технологій виготовлення та ремонту деталей ГТД адитивними методами нарощування із застосуванням ресурсозберігаючих і імпортозамінних порошків титанових сплавів вітчизняного виробництва, що забезпечують необхідні механічні властивості» (№ держреєстрації 0115U003863, 2015 р.);

– Г/Д № 2124 «Проведення комплексу конструкторсько-технологічних досліджень для виробництва лопаток ГТД з титанових сплавів на основі методів порошкової металургії і інтенсивної пластичної деформації» (№ держреєстрації 0114U007353, 2015-2017 рр.).

Мета і задачі досліджень. Мета роботи – підвищення механічних і службових властивостей зварних з'єднань спеченого титану в виробах складної конфігурації, отриманих за комплексною технологією і призначених для роботи в агресивних середовищах.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

– визначити фракційний склад порошків і режими пресування, які забезпечують необхідний рівень механічних й службових властивостей спечених заготовок;

– визначити засоби підвищення механічних і службових властивостей виробів з титану, отриманих методом порошкової металургії і зварювання;

– дослідити вплив способів зварювання тиском на структуру і механічні властивості зварних з'єднань виробів із порошків титану;

- дослідити корозійну стійкість і електрохімічні характеристики зварних з'єднань виробів із порошків титану;
- провести випробування отриманих виробів у промислових умовах;
- розробити технологічні рекомендації для впровадження результатів досліджень у промисловість.

Об'єкт досліджень – процеси структуроутворення в зварному шві, зонах термічного і термомеханічного впливу у виробках з порошків титану.

Предмет досліджень – закономірності впливу структури на механічні властивості та корозійну стійкість зварних з'єднань титанових виробів, отриманих методом порошкової металургії.

Методи досліджень. Визначення хімічного складу порошків титану і отриманих з нього виробів здійснювали рентгеноспектральним і хімічним методами, структуру – енергодисперсійним рентгеноспектральним аналізом. Металографічні дослідження структури і зламів проводили з використанням оптичного і растрового електронного мікроскопів. Механічні властивості визначали за стандартними методиками при статичних і ударних навантаженнях. Корозійну стійкість досліджували масовим методом з оцінкою швидкості корозії в 20 %-му розчині HCl і 40 %-му розчині H₂SO₄. Електрохімічне випробування здійснювали з використанням потенціостата IPC-Pro в потенціодинамічному режимі. Дослідження виконували у відповідності з діючими стандартами на приладах і обладнанні, які пройшли метрологічний контроль. Обробку статистичних даних виконували регресійно-кореляційним методом.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше встановлено закономірності формування структури з'єднань спеченого титану, що отримані методами зварювання тиском: контактним стиковим оплавленням, конвекційним тертям і тертям перемішуванням.

Встановлено загальні закономірності, які полягали в позитивному впливі означених способів зварювання на структуру зварного шва та зони термомеханічного впливу, а саме зменшення розміру та кількості пор. У зварних швах об'ємна частка залишкових пор складала 0,5...1,0 %, а їх розмір не

перевищував 3 мкм, в зоні термомеханічного впливу – 1...5 % та 10...20 мкм, в основному металі – до 15 % та 62 мкм відповідно, що пояснюється механізмом «заліковування» пор.

2. Вперше встановлено вплив структури зварних з'єднань порошкового титану, що отримані конвекційним зварюванням тертям, на опір корозійним процесам в водних розчинах неорганічних кислот.

Потенціал корозії зони зварного стику в порівнянні з потенціалом корозії основного металу мав більш позитивні значення (- 0,270 В проти - 0,365 В і - 0,196 В проти - 0,416 В), а щільність струму корозії знижувалась (0,162 А/м² проти 0,207 А/м² і 0,77 А/м² проти 0,151 А/м²) відповідно у 20 % хлоридній і 40 % сульфатній кислотах, завдяки формуванню однорідної структури і суттєвому підвищенню густини зварного стику.

3. Дістало подальшого розвитку уявлення про вплив фракційного складу вихідних порошків титану на формування структури, в тому числі пористості, а також на рівень механічних властивостей спеченого титану.

Встановлено, що оптимальною є фракція порошку $-0,55+0,1$ мм, яка забезпечила отримання пористості не більше 7 % із розміром пор до 62 мкм, твердості HB > 130 і границі міцності $\sigma_B \geq 345$ МПа.

4. Розширено уявлення про розподіл газових домішок азоту і кисню в структурних складових зварних з'єднань спеченого титану при зварюванні контактним стиковим оплавленням та конвекційним тертям в повітряній атмосфері. Встановлено, що при зварюванні на технологічних режимах не відбувається газонасичення металу шва і колошовної зони більше основного металу.

Мікрорентгеноспектральним енергодисперсійним якісним та кількісним аналізами доведено, що в означених видах зварювання, завдяки витисканню металу в ґрат, не відбувається насичення зварного з'єднання газовими домішками. Це дозволило отримати у зварних з'єднаннях вміст газу на рівні основного металу: $O_2 \leq 0,18$ %, $N_2 \leq 0,035$ %.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблена ресурсозберігаюча технологічна схема «порошкова металургія – зварювання» для отримання виробів складної конфігурації зі спеченого титану на основі сировинної та промислової баз підприємств України. Для даної технології визначено оптимальні тиск пресування і фракції титанового порошку марки ПТ (ТУ У 14-10-026-98), які забезпечують формування щільної структури заготовок із твердістю та границею міцності на рівні вимог, що близькі до титану марки ВТ1-0 в литому стані.

2. Виконано порівняльний аналіз трьох способів зварювання порошкових виробів з титану: контактним стиковим оплавленням, конвекційним тертям і тертям перемішуванням. Встановлено, що з технологічної та економічної точок зору оптимальним є конвекційне зварювання тертям.

3. За розробленою технологічною схемою методом порошкової металургії і конвекційного зварювання тертям виготовлено деталі запорної арматури, насосів і пруткові заготовки діаметром до 38 мм і довжиною до 700 мм. Отримані результати розширюють галузі використання виробів і напівфабрикатів з титану, в тому числі, в агресивних середовищах. Промислова апробація розробленої технологічної схеми показала її високу технічну і економічну ефективність, що підтверджено відповідними актами:

- працездатність дискових і кульових кранів DN15 і DN20 підтверджено в експлуатації на ТОВ «Авіа-Січ» і ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» з очікуваним річним економічним ефектом 217000 грн;

- для ДП "Кремнійполімер" виготовлена втулка методом порошкової металургії і зварена з титановим кільцем вала мулового насоса марки 28/2. Втулка після 1000 год напруцювання не мала слідів корозії. Нова технологія рекомендована до впровадження;

- на ДП «ДНДП Інститут титану» напівфабрикати з порошків титану напруцювали 170 годин в агресивних середовищах HNO_3 , H_2SO_4 , HCl , а їх корозійна стійкість майже не поступалась раніше використовуваному деформованому сплаву ВТ1-0. Технологію рекомендовано до впровадження.

Розроблено рекомендації на внесення змін до ТУ У 27.4-00201081-001-2003 «Елементи фільтруючі з титану»;

– результати досліджень використовуються в навчальному процесі на кафедрі обладнання і технології зварювального виробництва ЗНТУ в лекційних курсах з дисциплін «Теорія процесів зварювання», «Спеціальні методи зварювання тиском», «Зварювання різнорідних і композитних матеріалів», при виконанні студентами лабораторних, практичних, курсових та магістерських робіт.

Особистий внесок здобувача. У дисертаційній роботі основні положення, наукові результати та висновки отримані і сформульовані автором самостійно. Аналіз результатів досліджень та визначення закономірностей впливу фракції порошків і тиску пресування на структуру і властивості спеченого сплаву проводився безпосередньо автором цієї роботи. Здобувач сформулював і обґрунтував методологію проведення експериментів, які виконано за його участю.

Особистий внесок дисертанта в спільних публікаціях:

- аналіз актуальності проблеми і постановка задач досліджень [6, 12, 16];
- теоретичні та експериментальні дослідження впливу структури на закономірності руйнування спеченого титану [8-10], його зварних з'єднань [3-5, 7, 15, 16];
- визначення ефективності запропонованого методу виготовлення виробів з порошків титану [2, 11-14, 17];
- аналіз впливу режимів пресування на пористість спечених титанових виробів [10].

Апробація результатів дисертації. Основні висновки та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: X Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології життєвого циклу авіаційних двигунів і енергетичних установок» (2013, м. Алушта); XXII, XXIV Міжнародній науково-технічній конференції «Стародубовські читання» (2012, 2014, м. Дніпропетровськ); XXI Міжнародному конгресі двигунобудівників (2016, м. Коблево); IV Міжнародній науково-практичній конференції «Титан–2016:

Производство и применение в авиастроении» (2016, м. Запоріжжя); Науково-практичній конференції «Тиждень науки» (2017, м. Запоріжжя); IV Міжнародній конференції «Высокочистые материалы: получение, применение, свойства» (2017, м. Харків); XX Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Людина і космос» (2018, м. Дніпро), Міжнародній конференції «Титан 2018: виробництво та використання в Україні» (2018, м. Київ).

Публікації. Основні результати роботи знайшли відображення в 17 публікаціях, з них: 6 – у фахових наукових журналах, 4 – у фахових збірниках наукових праць, з яких 4 входять до наукометричних баз даних, а також в 6 матеріалах і тезах конференцій; отримано 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, містить список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг дисертації становить 198 сторінок, з них 135 сторінок основного тексту, 20 таблиць, 55 рисунків, 224 використаних літературних джерела на 26 сторінках і 7 додатків на 17 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ТИТАН, ПОРОШКОВА МЕТАЛУРГІЯ, ЗВАРЮВАННЯ

1.1 Властивості титану

Титан серед конструкційних матеріалів займає четверте місце за вмістом в земній корі після Al, Fe, Mg, проте промисловий спосіб його виробництва був розроблений тільки в 40-х роках XX століття. Причинами такого становища є висока хімічна активність титану, його інтенсивна взаємодія з киснем, азотом, воднем і ін. елементами. Забруднення титану цими домішками приводило до його різкого окрихчування і стримувало промислове впровадження. Чистий титан має температуру плавлення 1665°C , густину 4500 кг/м^3 , високі пластичність, корозійну стійкість і міцність.

Найбільшого поширення при одержанні титану з рутилових, ільменітових та інших руд отримав метод магнієтермічного відновлення. Цей метод включає наступні етапи:

- отримання з руд оксиду титану TiO_2 ;
- обробка титанових шлаків (TiO_2) хлором і отримання TiCl_4 ;
- відновлення титану за допомогою магнію по реакції:

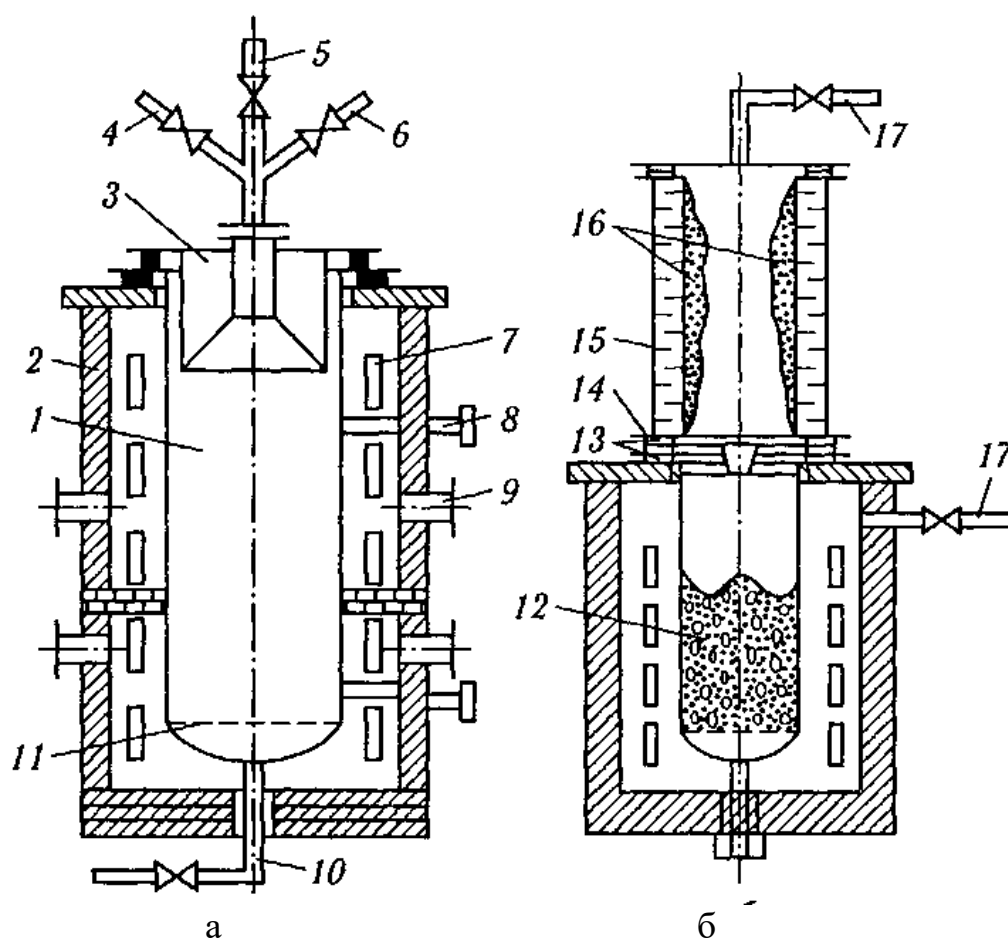


у сталевій реторті при температурі $850\ldots 900^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.1, а).

Частинки відновленого титану в реторті спікаються в пористу масу – губку, а рідкий MgCl_2 випускається крізь льотку. Залишки MgCl_2 з губки видаляють у вакуумі при температурі $850\ldots 900^{\circ}\text{C}$ (рис. 1.1, б).

Титанова губка містить до 2 % шкідливих домішок (кисень, азот, водень, хлор, залізо, кремній і ін.) і тому, зазвичай, піддається рафінуванню методом вакуумно-дугових і електронно-променевих переплавок для отримання чистого титану $\text{Ti} = 99,95\%$ або ж піддається дробленню з метою отримання порошків для

виготовлення виробів методом порошкової металургії (ПМ) [37].



а – апарат для відновлення хлориду титану TiCl_4 ;

б – апарат вакуум-термічного очищення титанової губки;

1 – реторта; 2 – електропіч; 3 – кришка; 4 – патрубок для підведення аргону; 5 – патрубок для подавання хлориду титану TiCl_4 ; 6 – патрубок для відсмоктування повітря; 7 – електронагрівник; 8 – термопар; 9 – канали для продування реторти повітрям; 10 – патрубок зливання хлориду магнію; 11 – ґратка; 12 – продукти реакції відновлення (титанова губка); 13 – ущільнення; 14 – екран; 15 – конденсатор, що охолоджується водою; 16 – конденсат з магнію і хлориду магнію; 17 – патрубок для вакуумування системи

Рисунок 1.1 – Установка для виготовлення титанової губки магністермічним способом [38]

В процесі вакуумного переплаву проводиться легування титану для

отримання сплавів з високими механічними та експлуатаційними властивостями. Титан практично не окислюється на повітрі і в морській воді, завдяки утворенню на його поверхні стійкої захисної плівки. З цієї ж причини титан має високу корозійну стійкість в ряді кислот (табл. 1.1) і навіть в «царській горілці», яка розчиняє золото [39].

Таблиця 1.1 – Корозійні властивості титану в деяких розчинах кислот [40]

Корозійна середа	Концентрація, %	Температура, °C	Швидкість корозії, мм/рік
Фосфорна кислота	5...30	20	0,125...1,25
Азотна кислота	70	100	до 0,125
	20	200	0,125...1,25
	70	290	більше 1,25
Соляна кислота	20	20	0,125...1,25
Сірчана кислота	6...75	20	до 0,125
Діоксид сірки	100	20	0,125...1,25
Морська вода	-	20	до 0,125

Висока корозійна стійкість дозволяє використовувати титан в хімічній, нафтовій, металургійній та інших галузях промисловості для виготовлення виробів, що працюють в агресивних середовищах, наприклад, трубопроводів, запорної арматури, насосів та інших виробів, що транспортують агресивні розчини.

Найбільше застосування для виготовлення зазначених виробів знаходять чистий титан і його низьколеговані сплави (табл. 1.2), що мають задовільний рівень механічних властивостей і високу корозійну стійкість (табл. 1.3) [41, 43]. З представлених в таблицях 1.2 і 1.3 даних видно, що зі збільшенням вмісту легувальних елементів відбувається підвищення характеристик міцності сплавів і зниження пластичності, ударної в'язкості і корозійної стійкості. У зв'язку з цим для виробів, що працюють в агресивних середовищах, слід віддати перевагу титану типу ВТ1-0 з урахуванням того, що транспортна і запорна арматури

працюють при невисоких механічних навантаженнях.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад α -сплавів титану, які застосовуються в хімічній промисловості (ГОСТ 19807 – 91)

Сплав	Легувальні елементи, % мас				Домішки, % мас., не більше				
	Mn	Mo	V	Al	C	N ₂	O ₂	H ₂	Fe
BT1-0	-	-	-	-	0,07	0,04	0,20	0,01	0,25
OT4-0	0,5...1,3	-	-	0,4...1,4	0,10	0,05	0,15	0,012	0,18
OT4	0,8...2,0	-	-	3,5...5,0	0,10	0,05	0,15	0,012	0,30
BT5	-	до 0,8	до 1,2	4,5...6,2	0,10	0,05	0,20	0,015	0,30

Таблиця 1.3 – Механічні і корозійні властивості α -сплавів титану при 20° С [43]

Сплав	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, кДж/м ²	Швидкість корозії в 10 % НСl при 20° С, г/м ² ·год
BT1-0	350...400	290...360	20...30	до 30	-	0,100
OT4-0	500...650	до 400	12...20	до 20	до 800	0,200
OT4	650...800	600...650	10...20	до 18	до 500	0,220
BT5	730... 930	700...900	10...12	до 12	до 400	0,160

1.2 Аналіз методів виготовлення виробів з титану і його сплавів

Вище зазначалося, що технічно чистий титан володіє більш високою корозійною стійкістю в порівнянні з його сплавами. У зв'язку з цим його застосування є виправданим для трубопроводів, запорної арматури, перекачувальних насосів та інших виробів, що працюють в агресивних середовищах. При цьому необхідно мати на увазі, що корозійна стійкість титану і його сплавів залежить від вмісту в них шкідливих домішок [44, 45, 46, 47].

Існує дві групи способів виготовлення вказаних виробів:

- технології, що включають вакуумні переплави, з наступними обробками методами тиску і лиття;
- методи порошкової металургії з використанням порошків, отриманих з титанової губки.

При цьому друга група є переважною та економною. У таблиці 1.4 наведено хімічний склад і механічні властивості зливка титану після вакуумно-дугового рафінування (рис. 1.2), виготовленого з нього прутка методами обробки тиском і спеченого порошкового матеріалу.

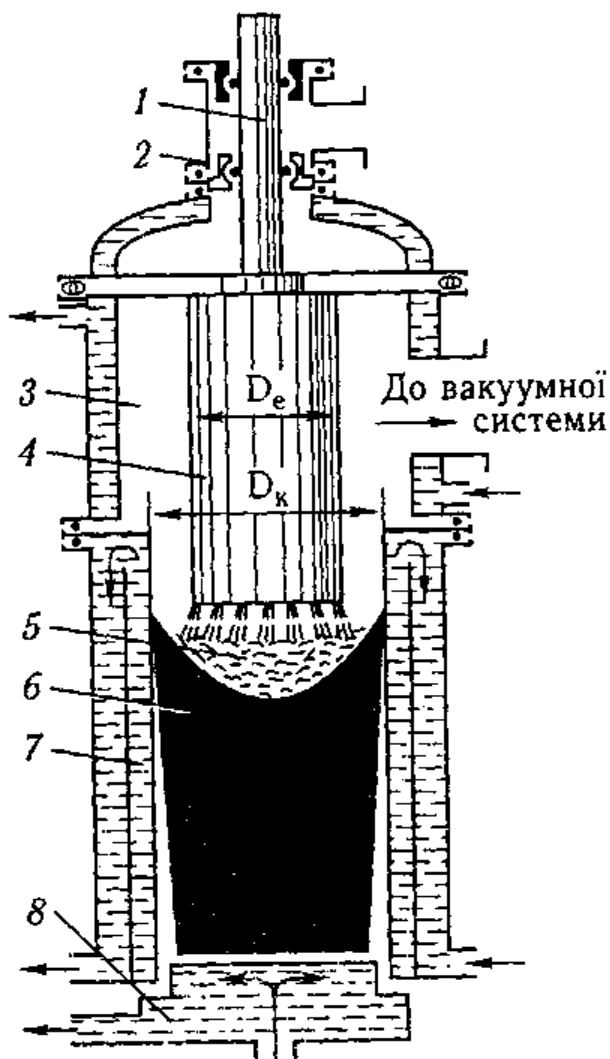
Таблиця 1.4 – Хімічний склад і механічні властивості заготовок ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91)

Заготовка	Середній вміст елементів, % мас.					Механічні властивості	
	Fe	Si	O ₂	N ₂	H ₂	σ_b , МПа	δ , %
Злиток	0,25	0,10	0,10	0,04	0,01	≥ 350	≥ 20
Пруток	0,20	0,08	0,14			≥ 345	≥ 22
Спечений порошок ПТ	0,18	0,10	0,20	0,042	0,01	$\geq 330,5$	$\geq 5,0$

З таблиці 1.4 можна зробити висновок, що хімічний склад наведених матеріалів приблизно однаковий. Показово, що межа міцності спеченого матеріалу практично дорівнює межі міцності матеріалу зливка, однак пластичність пресованого виробу була майже в 4 рази нижче в порівнянні з іншими зразками. Крім того, згідно з літературними даними [48, 49, 50], пори призводять до деякого зниження корозійної стійкості, внаслідок збільшення питомої поверхні матеріалів, що контактують з агресивними середовищами.

З рисунка 1.2 видно, що процес рафінування потребує складного обладнання, що включає вакуумну систему, кристалізатор і тому подібне. Отже, порошкова металургія, що використовує більш просте обладнання і не пов'язана з процесами виплавки, є більш економічною і доцільною для деталей типу запорної

арматури.



1 – струмопровідний шток з електродотримачем; 2 – вакуумний ущільнювач; 3 – робоча камера; 4 – витратний електрод; 5 – ванна рідкого металу; 6 – зливоч; 7 – водохолоджуваний кристалізатор; 8 – водохолоджуваний піддон

Рисунок 1.2 – Схема вакуумно-дугової печі з витратним електродом [38]

Відомо [51, 52, 53, 54], що основними технологічними прийомами, які дозволяють зменшити розміри і кількість пор є збільшення тиску пресування і зменшення розміру порошків. При цьому, в процесі пресування початковий об'єм порошку зменшується і утворюється брикет, що називається пресовкою, який має задані форму, розміри і властивості. Між тиском пресування і густиною одержуваних пресовок є певні залежності [55].

На початку пресування підвищення густини пов'язано з заповненням окремими частинками порожнин, що утворилися при засипанні порошку в пресформу, в основному через заклинювання частинок у зв'язку з «арочним ефектом». При цьому частинки переміщуються відносно вільно, займаючи прилеглі порожнини. Далі, при досягненні щільного укладання частинок, на кривій густина-тиск пресування є горизонтальна ділянка, внаслідок того, що частинки зазнають лише пружну деформацію.

На третій стадії відбувається пластична деформація частинок, зменшення кількості і розміру пор. В реальних умовах має місце накладення трьох зазначених стадій ущільнення, тобто пружна і пластична деформації можуть мати місце на всіх трьох етапах.

Автори робіт [56, 57, 58] механізми ущільнення і «заліковування» пор в металі (мідні зразки) пов'язували з рухом дислокацій, які під дією всебічного тиску спричиняють виникнення нових дислокацій, викликаючи зрушення і мікропластичну деформацію металу. З ростом температури дислокаційний механізм доповнюється дифузійним внаслідок граничної дифузії вакансій. Результати, отримані для міді, не можуть повною мірою бути застосовані для титанових сплавів.

Найбільш детально процеси пресування і спікання досліджені в роботах Ю.М. Подрезова, із співавторами [59, 60, 61, 62, 63]. Автори визначають, що незважаючи на велику кількість праць, присвячених одержанню титану методом ПМ в літературі мало комплексних робіт, в яких простежується еволюція структури пресовок титану на всіх етапах їх отримання.

В роботі [59] досліджено перший технологічний етап отримання порошкового виробу – процес ущільнення в прес-формі. На думку авторів роботи насьогодні багато статей, що аналізують зв'язок між тиском пресування і пористістю, носять формальний феноменологічний характер. Тому автори намагалися уточнити і пояснити процеси ущільнення порошкових титанових заготовок, які отримані з порошків п'яти фракцій (табл. 1.5). Для механічних випробувань з порошку кожної фракції шляхом холодного двостороннього

пресування було виготовлено по 10 циліндрів висотою 9,6...14,7 мм і діаметром 11 мм, спресованих під одним і тим же тиском. Після пресування вимірювали пористість зразків (табл. 1.6). Наведені значення пористості є усередненими даними для 10 зразків.

Таблиця 1.5 – Властивості вихідних порошків титану [59]

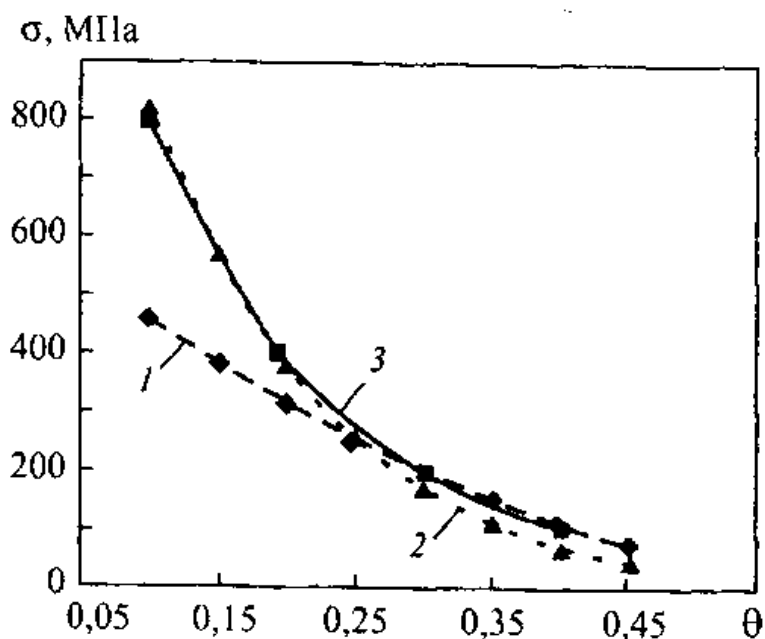
Фракція	Густина, г/см ³		Коефіцієнт Хаузнера $I = \rho_y / \rho_n$	Текучість, с
	насипна	утрушування		
-063	1,34	1,68	1,25	30,9
-063+05	1,32	1,58	1,20	36,5
-05+0315	1,31	1,63	1,24	33,3
-0315+02	1,32	1,63	1,23	30,0
-02+01	1,24	1,58	1,28	29,8

Таблиця 1.6 – Середня пористість зразків, отриманих в результаті ущільнення порошку титану різних фракцій [59] в %

Р, МПа	Фракція, мм				
	-063	-063+05	-05+0315	-0315+02	-02+01
100	41,19	39,95	40,34	40,35	42,23
200	31,00	29,94	30,17	29,09	33,22
400	20,31	19,10	19,77	18,24	22,12
600	14,21	14,26	14,10	14,51	15,60
800	10,25	9,89	9,87	10,60	11,72

З аналізу таблиці 1.6 видно, що зі збільшенням тиску пресування для всіх фракцій пористість знижувалась. Вплив розміру частинок на пористість пресовок менш значний і неоднозначний – вона дещо збільшується зі зменшенням розміру частинок порошку. За результатами досліджень авторами роботи [59] було побудовано криву густини порошкового титану і виконано теоретичний розрахунок. Теоретичні результати узгоджувались з експериментальними даними

авторів та інших дослідників (рис. 1.3).



1 — [64, 65]; 2 — [66]; 3 — результати експерименту [59]

Рисунок 1.3 – Криві впливу пористості порошкового титану на границю міцності

В роботі Ю.М. Подрезова зі співавторами [60], присвяченій аналізу закономірностей формування механічних властивостей пористих заготовок з титану, автори провели випробування на чотириточковий вигин, стиск, а також досліджували вплив пористості і розміру частинок на модуль пружності, межу міцності і деформацію до руйнування титанового брикету. На думку авторів властивості неспеченого брикету визначають рівень властивостей спечених порошкових виробів з титану.

Значний внесок у дослідженні формування структури і властивостей порошкових виробів з титану в процесах пресування і спікання зробили О.М. Івасишин та О.М. Шаповалова. Згідно з даними цих авторів із співавторами [67, 68], на поверхні титанових порошків знаходяться домішки кисню, вуглецю, хлору, магнію і кальцію, а також солі цих елементів. Кисень знаходиться у складі діоксиду титану TiO_2 і гідроксогрупи OH [68]. Наявність домішок як в порошку металевому титану, так і в порошку гідрованого титану, істотно впливає на процес

спікання і сприяє зниженню пористості пресовки [69, 70] внаслідок того, що легкоплавкі з'єднання, які утворюються з них, в ряді випадків заповнюють пори, що обмежує процес спікання і рекристалізації. Порошок титану починає спікатися при температурах вище 700°C , при яких відбувається розчинення захисної оксидної плівки з діоксиду титану. Застосування порошку гідрованого титану, призводить до зниження температури початку спікання до 600°C . У процесі спікання відбувається дегідрування порошку, тобто виділення водню з матеріалу і, відповідно цьому процесу, об'ємні зміни у вигляді усадки [71].

Крім порошків титану і його сплавів в металевому вигляді знаходять застосування порошки гідриду титану в зв'язку з тим, що водень призводить до окрихчування титану і полегшує отримання порошків з титанової губки. Технологія гідрування - дегідрування є досить відомою в наш час і детально описана в працях Ільїна А.А., Шаповалової О.М., Івасишина О.М., Бабенко Е.П. [72, 73, 74, 75, 76, 77].

У роботах А.А. Скребцова із співавторами [78, 79] досліджено питання формування структури і властивостей порошкового титану, отриманого з суміші порошків ПТ5-1 + TiH_2 . В результаті аналізу впливу порошкової суміші і механізмів руйнування при статичних навантаженнях було отримано регресійні залежності, які показали, що оптимальний склад суміші наступний: 92...88 % ПТ5-1 і 8...12 % TiH_2 , що призводило до зниження кількості пор на 5 % і до підвищення механічних властивостей приблизно на 20 % в порівнянні з властивостями спеченої пресовки з 100 % порошку ПТ5-1.

У роботі В.А. Назаренка [80] наведено результати дослідження вмісту гідриду титану від 0 % до 100 % в суміші з електролітичним порошком марки ПТЕС на процес ущільнення суміші в жорсткій прес-формі. Встановлено, що при вмісті гідриду титану понад 20 % порошок суміші перестає текти через отвір воронки діаметром 5 мм (табл. 1.7). Це значно ускладнює автоматизацію процесів пресування деталей на пресах-автоматах. В.А. Назаренко [80] також зроблено висновок, що високотемпературний нагрів до 1200°C не призводив до повного видалення водню з пресовок, з ростом тиску пресування з 200 МПа до 800 МПа

пористість пресовки з чистого титану знижувалася від 46 % до 9,5 % і зростала в інтервалі дослідних тисків пресування пропорційно збільшенню вмісту гідриду в складі шихти (табл. 1.8).

Таблиця 1.7 – Дані технологічних властивостей сумішей порошків титану і гідриду титану [80]

Вміст TiH_2 , % ваг.	Насипна вага, $г/см^3$	Вага утрушування, $г/см^3$	Текучість, с
0	1,91	2,30	9,55
5	2,03	2,39	9,65
10	2,10	2,50	9,75
20	2,00	2,48	11,6
40	1,87	2,50	-
60	1,67	2,21	-
100	1,29	1,72	-

Таблиця 1.8 – Значення пористості неспечених матеріалів при пресуванні

Тиск пресування, МПа	Ti	Ti + 5 % TiH	Ti + 10 % TiH	Ti + 20 % TiH	Ti + 40 % TiH	Ti + 60 % TiH	100 % TiH
200	46,0	-	-	-	-	-	35,0
300	-	-	-	-	-	-	30,0
400	36,2	25,9	20,3	21,1	-	25,4	26,3
500	-	-	-	17,8	23,9	18,7	22,9
600	13,9	16,1	14,5	15,2	14,8	15,6	19,9
800	9,5	11,4	9,9	11,1	11,2	12,5	15,3

Відомо, що спікання порошкової формовки полягає в її витримці при температурі нижче температури плавлення основного компонента з метою отримання заданих фізико-механічних властивостей виробу. Це одна з найважливіших технологічних операцій, в результаті якої відбувається

перетворення нестійкої пресовки в міцний спечений виріб із властивостями, які наближаються, а іноді і перевершують властивості литого металу. Таке перетворення відбувається внаслідок зміни характеру міжчасткових контактів: механічно пов'язані частинки порошку внаслідок дифузії утворюють області металу, що належать відразу декільком частинкам.

Знайшли застосування два різновиди процесу спікання:

- твердофазне, без утворення рідкої фази;
- рідкофазне, за якого нагрів призводить до оплавлення одного з компонентів суміші.

В цілому, спікання [69, 70, 81] являє собою процес розвитку міжчасткового зчеплення і, як наслідок, формування властивостей матеріалу при нагріванні пресовки. Згідно [69, 70], одним із факторів, що впливають на процес спікання, є енергія, яка надається частинкам порошку при пресуванні і звільняється при нагріванні. У роботах [69, 70, 81] показано, що збільшення зусилля пресування прискорює процес спікання і призводить до зниження пористості. При спіканні тиск газу всередині пори, внаслідок нагріву, гальмує її зменшення. Відомо, що розміри і кількість пор при цьому визначають рівень механічних властивостей металу.

Спікання титанових порошкових заготовок проводиться при температурі 1200...1300° С. При цьому має місце перетворення спресованих порошків в суцільне тіло, внаслідок чого його властивості стають близькими до властивостей компактного матеріалу. На думку Гича Г.А. [70], спікання є процесом, що складається з двох стадій:

- розвиток дифузійного контакту дотичних частинок;
- усунення пористості.

У роботах О.М. Шаповалової, Е.П. Бабенко, Е.М. Матвійчука [67, 76, 82] показано, що при спіканні титану, як і інших металів, одночасно відбувається кілька процесів:

- дифузія атомів;
- пластична деформація;

- коалесценція пор;
- рекристалізація;
- відновлення оксидів на поверхні частинок, рух вакансій і дислокацій.

Проведено аналіз переваг і недоліків технологій виготовлення деталей. Доведено, що деталі складної конфігурації для металургійної та хімічної промисловості доцільно отримувати методом порошкової металургії із застосуванням зварювання. З метою максимального спрощення і здешевлення технології виробництва заготовок з порошків титану при задовільних показниках механічних властивостей необхідно визначення оптимальних параметрів. Виявлено ряд завдань, вирішення яких дозволить отримувати спечені титанові вироби при зниженні загальної собівартості: визначення впливу тиску пресування і фракційного складу порошків магнієтермічного способу виробництва на структуру титанових сплавів.

1.3 Зварювання титану і його сплавів

1.3.1 Основні властивості й зварюваність титану

Титан має дві алотропічні модифікації: α -титан з щільноупакованою гексагональною ґраткою і β -титан з об'ємноцентрованою кубічною ґраткою. Температура поліморфного перетворення титану $\alpha \leftrightarrow \beta$ дорівнює 882° С. Сплави з α -структурою: технічний титан BT1, BT5 (5 % Al) і BT5-1 (5 % Al, 2,5 % Sn) мають високу термічну стабільність, практично не окрихчуються під дією високих температур і добре зварюються всіма видами зварювання [83].

Відмінною особливістю і недоліком титану є його здатність взаємодіяти з газами (киснем, азотом, воднем), а також з вуглецем при підвищених температурах, які мають місце, в тому числі, і при зварюванні. В результаті цієї взаємодії знижується пластичність і ударна в'язкість і підвищується міцність титану (рис. 1.4), що в цілому призводить до окрихчування основного металу і

шву, і до утворення тріщин в зварних конструкціях [83].

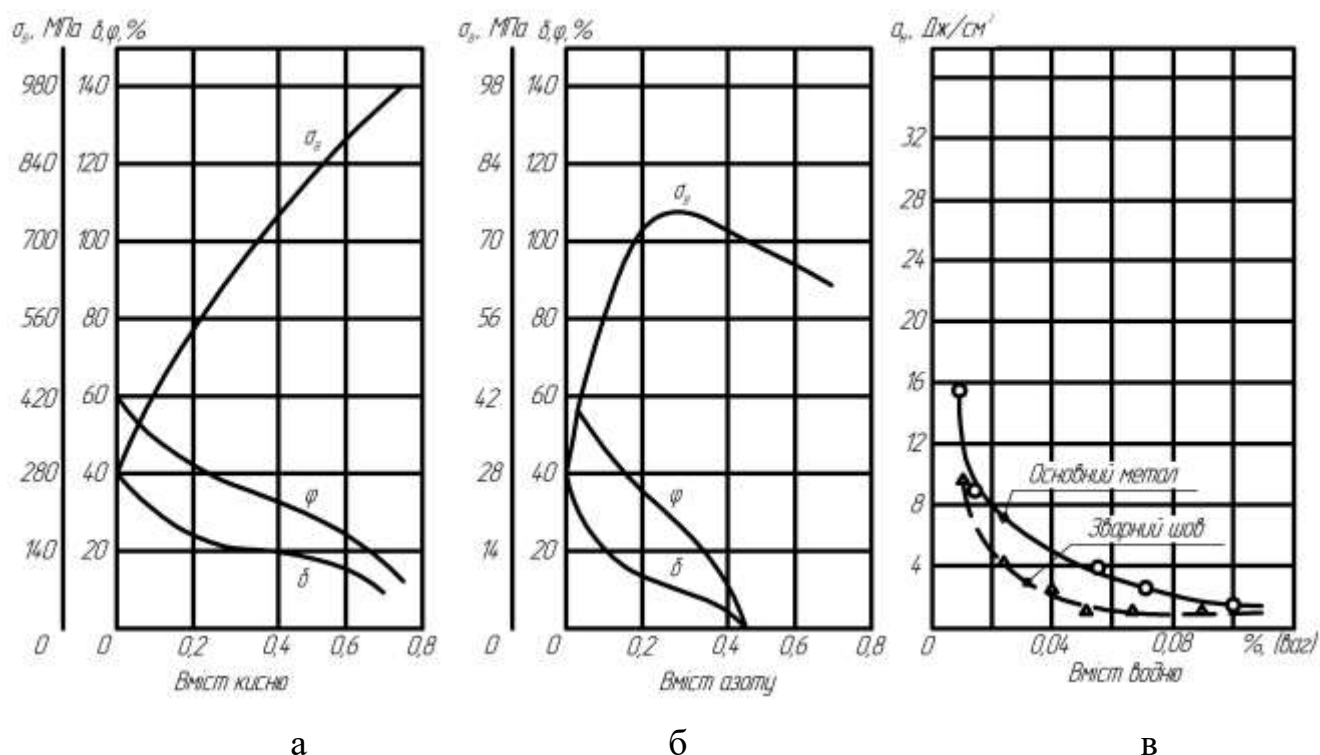


Рисунок 1.4 – Вплив вмісту кисню (а), азоту (б) і водню (в) на механічні властивості титану [84]

Як видно з представлених на рисунку 1.4 даних, з ростом вмісту водню до 0,7 % показники пластичності знижуються в 4...6 разів при одночасному підвищенні межі міцності в 3,5 рази. Азот, подібно кисню, також сприяє зниженню пластичності і підвищенню міцності титану. Відомо, що ударна в'язкість є одним з основних показників, що визначають опір конструкційних матеріалів зародженню і поширенню тріщин. Зниження цього показника у 5...8 разів в поєднанні з різким падінням пластичності (див. рис. 1.4) безумовно, є основним фактором, що полегшує утворення тріщин в зварних конструкціях з титану і його сплавів.

У зв'язку з тим, що активне поглинання титаном газів починається при температурах: мінус 350° С – кисню, мінус 550° С – азоту і мінус 250° С – водню, практично при всіх видах зварювання і особливо при зварюванні плавленням. Отже, необхідний захист як зони зварювання, так і основного металу від взаємодії

з атмосферою.

Г.П. Фетисов і Ф.А. Гарифулин [85] наводять поділ видів зварювання на три класи: термічне, термомеханічне і механічне. Нижче наводиться короткий аналіз технології отримання зварних з'єднань титану різними видами зварювання.

1.3.2 Зварювання плавленням (термічне)

За даними А.Г. Селіверстова [86], в авіаційній промисловості для зварювання титанових сплавів застосовується широкий спектр способів зварювання [87, 88, 89]. Найбільшого поширення набули аргонодуговий і електроннопроменевий способи зварювання [90, 91].

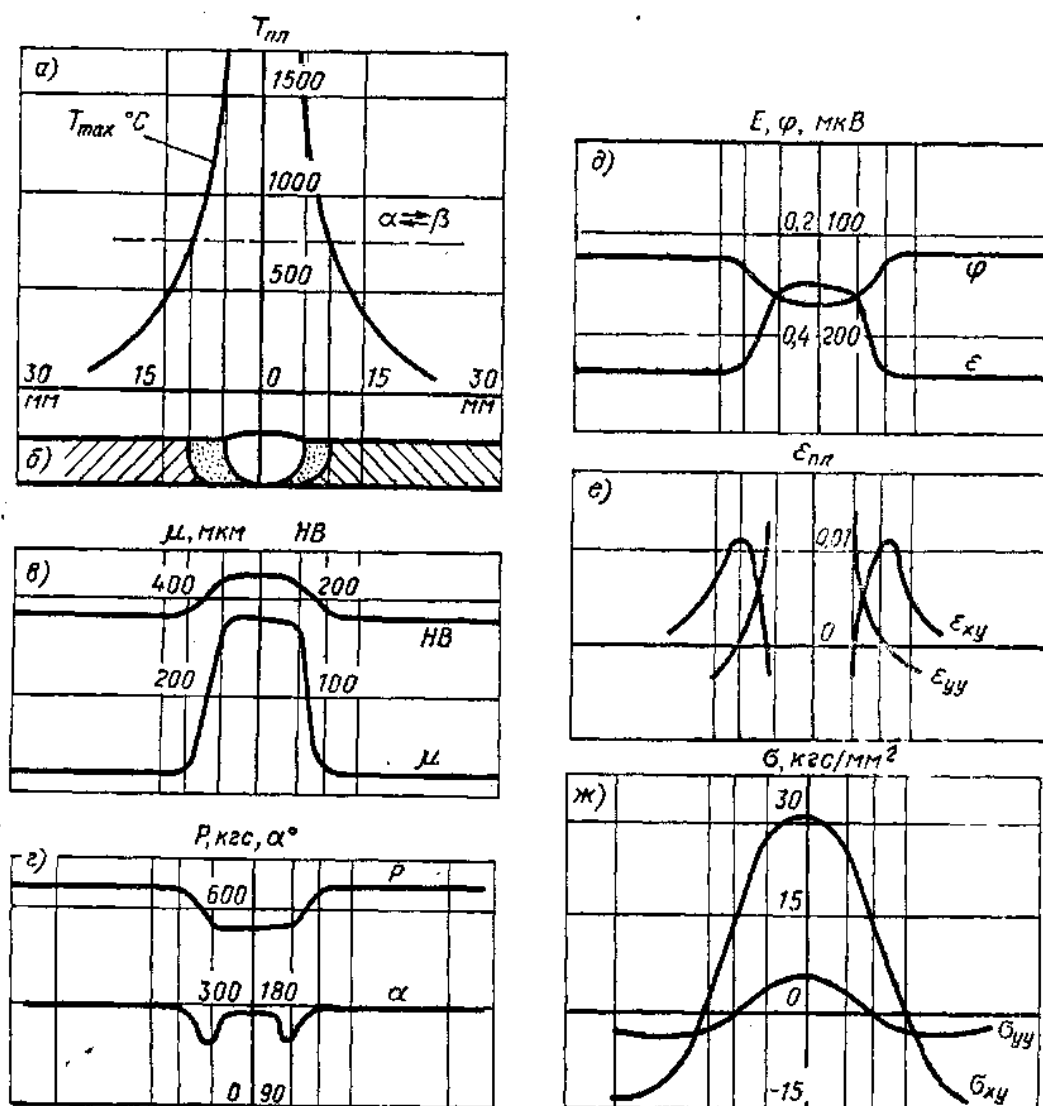
Аргонодугове зварювання виконується із місцевим або загальним захистом в камерах з контрольованою атмосферою. Однак, незважаючи на досить високий рівень захисту від окислення, спостерігається деяке зниження міцносних властивостей зварних з'єднань в порівнянні з основним металом.

Електроннопроменеве зварювання забезпечує більший рівень захисту металу шву титанових сплавів від окислення, при цьому висока концентрація теплової енергії дозволяє вести зварювання на високих швидкостях процесу і отримувати зварні з'єднання з малими розмірами шву і зони термічного впливу при мінімальних величинах усадки, деформації і внутрішньої напруги в зварному шві. Завдяки швидкому охолодженню метал шву має дрібнозернисту структуру.

При зварюванні плавленням в зонах шву і термічного впливу спостерігається значний градієнт температур (рис. 1.5) внаслідок чого навіть в стабільних α -сплавах титану утворюються ділянки крупнокристалічного металу з голчастою структурою α' -фази, що приводить до зниження пластичності і до підвищення схильності металу до утворення тріщин.

В роботі [86] встановлено, що при аргонодуговому зварюванні двофазних титанових сплавів BT3-1, BT8 і BT9 в зварному шві утворюється метастабільна

мартенситна α -фаза, яка веде до його окрихчування. В результаті, порівняно з основним металом, ударна в'язкість зварних зразків знизилася приблизно до 3 разів. Низька пластичність зварного з'єднання негативно позначилась також і на витривалості.



а – максимальні температури; б – схема зварного з'єднання; в – твердість НВ і розмір зерна μ ; г – механічні властивості при загині (Р – несуче навантаження; α – кут загину); д – електродний ϕ (3 % NaCl) і термоелектричний Е потенціал (мкВ); е – залишкові пластичні поздовжні ϵ_{xy} і поперечні ϵ_{yy} деформації; ж – залишкові поздовжні σ_{xy} і поперечні σ_{yy} напруження

Рисунок 1.5 – Неоднорідність властивостей зварного з'єднання в поперечному перерізі технічного титану ВТ1-0 товщиною 2 мм при аргонодуговому зварюванні [92]

Результати досліджень А.Г. Селіверстова добре узгоджуються з даними роботи [92], (див. рис. 1.5) і свідчать про істотну різницю в структурі, механічних властивостях, залишкових напруженнях, електродному і термоелектричному потенціалі зварного шву і основного металу. На думку авторів [92], в результаті оптимізації режимів зварювання плавленням, застосування відповідних режимів термічної обробки не дозволяє отримати рівень властивостей шву на рівні властивостей основного металу.

В результаті аналізу літературних даних [93, 94, 95, 96, 97] можна виділити такі основні недоліки зварювання плавленням титану і його сплавів:

- насичення рідкого металу киснем, азотом і воднем внаслідок високої хімічної активності титану при високих температурах;
- низька теплопровідність, і як наслідок, мала чутливість титану до теплового впливу при зварюванні, яка призводить до зростання зерна, структурних і фазових змін в шві і зоні термічного впливу, а також зміни міцності і пластичних властивостей;
- висока ймовірність утворення гарячих тріщин і пор в шві і зоні термічного впливу внаслідок насичення газами і структурних змін в результаті нагрівання і охолодження;
- вірогідність невідповідності властивостей зварного з'єднання заданим експлуатаційним вимогам.

Мінімізація зазначених недоліків досягається комплексом заходів [92]:

- стандартні зварювальні устаткування забезпечуються додатковими пристроями для захисту зони зварювання;
- застосовуються спеціалізовані зварювальні пальники та пристрої;
- захист розплавленої ванни здійснюється газом (аргоном) вищого сорту (ГОСТ 10157-2016);
- застосовуються пристосування захисту частини, яка остигає, і зворотного боку шву.

1.3.3 Термомеханічне зварювання

До термомеханічних видів зварювання належать: дифузійне, контактне, індукційно-пресове, термокомпресійне, пічне і ін. Порівняно зі зварюванням плавленням, при зварюванні зазначеними видами здійснюється менше тепловкладення в зварювальний шов, що актуально із зазначених вище причин для титанових сплавів, схильних до поглинання газів і, часто, небажаних структурних перетворень.

Дифузійне зварювання, згідно з даними Бондаря О.В. із співавторами [98], є перспективним процесом, що дозволяє отримувати тонкостінні шаруваті конструкції для аерокосмічної техніки. При цьому способі зварювання формування дифузійного з'єднання відбувається у вакуумі під дією стискаючих навантажень. Основними факторами, що визначають якість одержуваного з'єднання, є підготовка поверхонь, які зварюються, їх вихідна структура, температура і час процесу [98, 99, 100]. Згідно [98], при температурі нижче початку поліморфного перетворення (для сплаву ВТ14 $T_{\text{пп}} = 920^{\circ}\text{C}$) процес формування з'єднання лімітується активацією поверхонь, що з'єднуються, при більш високих температурах – розвитком фізичного контакту.

Безумовною перевагою дифузійного зварювання є можливість отримання зварного з'єднання з показниками міцності і пластичності на рівні основного металу. Колективом авторів на чолі з В.В. Пешковим [101, 102, 103, 104, 105] виконано фундаментальні дослідження з вивчення процесів дифузійного зварювання титанових сплавів, встановлено нові залежності і видано рекомендації щодо вдосконалення цього процесу. Однак, незважаючи на це, технологія дифузійного зварювання не позбавлена недоліків, до числа яких відносяться тривалість процесу, необхідність ретельної підготовки поверхонь, що зварюються, а також здійснення зварювання в вакуумі.

Контактне зварювання відноситься до найбільш поширених високопродуктивних технологій, застосовуваних у багатьох галузях

промисловості, в тому числі в автомобілебудуванні, авіабудуванні та ін. Що стосується титанових сплавів, для отримання якісних зварних з'єднань з необхідним рівнем механічних властивостей необхідна підготовка деталей, які зварюються: видалення забруднень ацетоном, протирання ганчіркою, обробка травленням (30 % HNO_3 , 3 % HF , 67 % H_2O), промивка у воді не менше 5 хв, зневоднення ацетоном і протирання. При точковому зварюванні захист інертним газом не потрібний, завдяки щільному контакту і стисненню деталей, що зварюються. У той же час, шовне і стикове зварювання вимагають захисту аргоном. Завдяки високому електричному опору і малої теплопровідності титану спрощується процес контактного зварювання і створюється технічна можливість для багатоелектродного зварювання.

Всі розглянуті особливості термомеханічного зварювання було встановлено для монолітних стандартних титанових сплавів. Чи можливо застосовувати ці залежності впливу на порошкові титанові сплави необхідно встановлювати додатково.

1.3.4 Механічне зварювання

До різновидів механічного зварювання можна віднести: холодне, вибухом, ультразвукове, тертям, магнітноімпульсне та ін. способи з'єднання деталей. Стосовно титанових сплавів, важливою перевагою цих видів зварювання є відсутність джерел тепла і, як наслідок, мінімальний розігрів деталей, що з'єднуються. В останній час більш широке застосування знайшли два види зварювання: тертям і тертям перемішуванням. Принципові схеми цих видів зварювання розглядаються в наступному розділі роботи.

Зварювання тертям є одним з ефективних способів з'єднання вуглецевих і легованих сталей, чавунів, кольорових металів та їх сплавів. Важливою перевагою цього способу є те, що зварене з'єднання утворюється в результаті тертя і

спільного пластичного деформування деталей, що з'єднуються в твердій фазі [106, 107]. Генерування тепла відбувається в результаті перетворення механічної енергії в тепло, що виділяється на дотичних поверхнях деталей, притиснутих одна до одної.

Насьогодні найбільшого поширення набули різновиди процесу зварювання тертям: конвекційне та перемішуванням (ЗТП). Конвекційне зварювання тертям застосовується при з'єднанні деталей циліндричної форми. Методом ЗТП з'єднуються зазвичай листові матеріали і труби [108].

До основних переваг зварювання тертям можна віднести [95, 109, 110, 111, 112, 113, 114]:

- можливість отримання властивостей зварних з'єднань на рівні основного металу;
- вузька зона розігріву і малий розмір шву та незначні напруження в зварному шві в порівнянні із зварюванням плавленням;
- практично повна відсутність викривлення і термічних деформацій;
- зменшення виробничого циклу на 50...75 % порівняно зі звичайними способами зварювання (наприклад, дуговим);
- можливість зварювання деталей з різнорідних матеріалів, а також матеріалів, що вступають в процесі спільного нагріву в хімічну взаємодію і утворюють дисперсні інтерметалідні з'єднання;
- стабільність, висока повторюваність та можливість механізації і автоматизації процесу зварювання;
- низькі машинний час зварювання, механічна обробка деталі до та після зварювання, загальні витрати енергії;
- відсутня необхідність у флюсах, присадочних матеріалах і захисних газах, електродах і т.п.

Завдяки перерахованим вище перевагам, зварювання тертям є перспективним способом з'єднання виробів з титану і його сплавів [115, 116]. Це дозволяє розширити можливості і області застосування цього виду зварювання при виготовленні і ремонті різних деталей з титану і його сплавів.

У роботі А.Г. Селиверстова із співавторами [94] представлено результати досліджень структури і механічних властивостей зварних з'єднань із сплаву ВТЗ-1, отриманих зварюванням тертям. Сплав використовувався в конструкції осевого компресора авіаційних газотурбінних двигунів, у зв'язку з чим, до якості зварних з'єднань висуваються підвищені вимоги. Автори поставили за мету оптимізацію режиму зварювання сплаву ВТЗ-1 на сучасному обладнанні. На підставі результатів металографічних досліджень і механічних випробувань основного металу і зварних швів, отриманих на повітрі і в захисній атмосфері (аргон), встановили, що ротаційне зварювання тертям забезпечило отримання якісних бездефектних з'єднань в широкому інтервалі зміни технологічних параметрів. Міцність зварних з'єднань перевищувала міцність основного металу внаслідок інтенсивної термомеханічної деформації при температурах, що перевищують температуру β -переходу і високій швидкості охолодження.

Зварювання тертям перемішуванням є одним з новітніх способів зварювання. Воно виконується торцем, що обертається та переміщується в напрямку зварювання.

На практиці ця технологія використовується в основному для алюмінієвих сплавів [117]. В Україні значний внесок в розробку даного методу внесли Покляцький А.Г. [118, 119, 120, 121, 122, 123, 124], Вакуленко І. О. [125, 126, 127, 128].

Однією з основних проблем, що стримують розвиток даного методу є те, що для кожної практичної задачі необхідно розробляти спеціальну конструкцію зварювального інструменту. Для матеріалів, більш міцних, ніж алюміній, проблемою стала стійкість інструменту, що викликає необхідність використовувати тверді сплави і надтверді композити на основі кубоніту бора. Так, для зварювання титанового сплаву розроблено інструмент з карбідів вольфраму і гафнію [129].

До інших матеріалів, які зварюються ЗТП, відносяться: мідь і її сплави [130], свинець, магнієві сплави, сталі, сплави на титановій і нікелевій основах, термопластичні полімери [131, 132]. Для чистого титану і його сплавів товщиною

1...12 мм продемонстровані позитивні результати, щодо їх ЗТП [117, 133, 134, 135]. Для практичної реалізації зварювання титану та його сплавів, отриманих методом ПМ необхідні додаткові дослідження.

Проведено аналіз методів зварювання та їх впливу на матеріал деталей. Показано, що найбільш перспективними серед методів зварювання порошкових виробів з титану можуть бути: стикове зварювання оплавленням, конвекційне зварювання тертям, зварювання тертям перемішуванням. Огляд сучасних публікацій стану цього питання дозволив встановити, що найбільш поширені дані стосуються зварювання тертям деталей з однофазних титанових сплавів, отриманих методами лиття та обробки тиском. Структура та властивості сплавів, що отримані методом порошкової металургії, багато в чому залежать від технології виробництва, а саме від тиску при пресуванні, фракції порошку, технології зварювання та ін. Це вимагає проведення досліджень щодо впливу пористості спеченого титану на зварюваність та якість зварних з'єднань.

1.4 Особливості корозії зварних з'єднань спеченого титану

В значній мірі залишковий ресурс виробів визначається характеристиками міцності. Залежно від конкретних умов експлуатації зниження міцності дуже часто відбувається внаслідок корозійних пошкоджень. Тому надійна і довговічна робота таких виробів і їх зварних з'єднань в значній мірі визначається їх корозійною стійкістю. Проблема корозії зварних з'єднань актуальна в Україні та світі, особливо в сучасних економічних умовах дефіциту металу і енергетичних ресурсів. Зниження втрат металу від корозійних пошкоджень, особливо в зв'язку зі збільшенням споживання в промисловості різних типів металопродукції, набувають особливо важливого значення. У цих умовах зростають вимоги до надійності деталей та конструкцій. Корозія – процес неминучий, однак знання механізму корозії дозволяє впливати на корозійний процес, забезпечуючи тим

самим безвідмовну роботу виробів протягом тривалого часу [136]. Виділяють наступні основні види корозійних руйнувань зварних з'єднань титану і його сплавів: місцева і зосереджена суцільна корозія, місцева межкристалітна, корозійно-втомне руйнування крихкого типу, водневе розтріскування, сольова і щілинна корозії [137]. Тому виникає необхідність корозійних досліджень зварних з'єднань.

По корозійній стійкості зварних з'єднань різних сплавів титану, отриманих саме традиційними методами, існує багато робіт, в яких автори проводять порівняльні дослідження з основним металом в ненапруженому і напруженому станах. Вважалося, що корозійна стійкість практично рівноцінна основному металу [138], в тих умовах, де можливо використання титану. У випадках наявності підвищеної корозії, вона виявляється тільки в колошовній зоні термічного впливу (ЗТВ) [138, 139], хоча не виключена можливість підвищеної корозії і в зварних швах [140]. ЗТВ є найбільш ослабленою ділянкою зварного з'єднання [141, 142]. Вразливість ЗТВ пов'язана з максимальними розтягувальними залишковими зварювальними напруженнями, отриманими внаслідок локального розплавлення [143, 144]; електрохімічною гетерогенністю, обумовленою структурною (різні швидкості охолодження формують різні типи та розміри структури), хімічною (сегрегація домішок та легувальних елементів із основного металу в зварювальну ванну) [145, 146, 147], геометричною та фізичною неоднорідностями [148].

Істотно на корозію зварних з'єднань впливає технологія зварювання [149, 150]. Більшість попередніх досліджень проводились на з'єднаннях, отриманих методами зварювання плавленням. При застосуванні останніх можлива різна корозійна стійкість, обумовлена пористістю шву [151], зміною хімічного складу металу шву в результаті використання зварювальних матеріалів (електроди, дрід, флюси), структури металу шву та колошовної зони в результаті розплавлення, а висока температура нагріву сприяє більшому сегрегуванню легувальних домішок. Методи зварювання тиском мають перевагу в цьому сенсі [152]. Але і в даному випадку корозійні властивості зварних з'єднань титанових сплавів чутливі до

структурного стану матеріалу. Одні дослідження вказують на те, що в крупнозернистому металі шву та зоні термічного впливу у зв'язку зі зменшенням загальної довжини границь, концентрація домішок на границях підвищується, що є причиною зниження корозійної стійкості [153]. З підвищенням ступеня дисперсності структури корозійні властивості знижуються [154]. Тому характерні для методів зварювання тиском деформації можуть змінити електрохімічні характеристики поверхні, що пов'язано зі зміною текстури та перерозподілом сумарної протяжності меж зерен, як це відбувається при прокатуванні сталі [155, 156, 157]. Формування кристалографічної текстури може бути обумовлено пластичною деформацією або $\beta \rightarrow \alpha$ фазовим перетворенням [158]. При деяких видах зварювання тиском в ЗТМВ зерна можуть бути зорієнтовані нормально до поверхні деталі, що робить її максимально вразливою до міжкристалітної корозії [159].

Таким чином, основними вимогами, що пред'являються до технології зварювання, є можливість створювати зварні з'єднання без значних змін в структурі і хімічному складі зварюваних напівфабрикатів за рахунок мінімального термічного впливу. Відомо, що для забезпечення опору електрохімічній корозії при виборі матеріалів та методів зварювання виходять з умови рівності зон зварного з'єднання [160]:

$$\varphi_1 \leq \varphi_2, \quad (1.2)$$

де φ_1 , φ_2 – електродні потенціали основного та зварного металу відповідно, В.

Характерною рисою матеріалів, отриманих методом ПМ, є наявність залишкової пористості, що негативно впливає на корозійну стійкість. Тому, внаслідок структурної неоднорідності, електрохімічні характеристики спечених матеріалів відрізняються від литих та деформованих. Електрохімічна поведінка та шляхи її підвищення для технічного титану, отриманого як за традиційними технологіями, так і синтезованого методом порошкової металургії достатньо добре висвітлені у спільних роботах дослідників Запорізького національного

технічного університету та Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенко НАН України [48, 49, 50, 161, 162, 163]. Незважаючи на те, що технології порошкової металургії активно розвиваються, на сьогодні кількість даних про корозійну стійкість зварних з'єднань компактованих титанових сплавів обмежена і немає чіткого уявлення щодо механізмів цього явища. Вище зазначені факти помітно звужують сферу застосування спеченого титану і ставлять питання про додаткові дослідження з метою її розширення. При зварюванні спечених матеріалів в одному елементі формуються дві різні структури – одна щільна (лита) в шві, друга – із залишковою пористістю – вихідна в основному металі. Це може привести до утворення різної корозійної стійкості цих структур. Зварний шов та колошовна зона спечених заготовок відрізняються більшою густиною відносно основного матеріалу [164], що повинно позитивно впливати на його корозійну стійкість. Причому, пори в зоні шва мають менший розмір, більш рівномірно розподілені в об'ємі металу в порівнянні з порами в колошовній зоні [165]. Однак, на інтенсивність корозії зварних з'єднань, крім цього, впливають наявність можливих зварювальних дефектів, конструктивні особливості зварного з'єднання, наявність термообробки [166]. З урахуванням важливості спеченого титану як конструкційного матеріалу, дослідження корозійної поведінки зварних з'єднань представляють особливий інтерес.

Для оцінки можливості застосування зварних з'єднань спечених титанових сплавів в металургійній, хімічній промисловості необхідно провести дослідження на предмет впливу структурної неоднорідності на електрохімічні характеристики матеріалів і на загальну корозійну стійкість в розчинах мінеральних кислот. Тому визначення електрохімічних характеристик різних зон зварних з'єднань, а також визначення загальної корозійної стійкості зварних з'єднань спеченого титану є важливою задачею.

Результати цього розділу наведено в наступних публікаціях здобувача [164, 165, 167, 168, 169, 170].

1.5 Постановка цілі і задач досліджень

Традиційне виробництво деталей з титану і його сплавів реалізується за схемою: магнієтермічне відновлення титану – отримання титанової губки – отримання з губки електродів, що витрачаються – вакуумнодуговий переплав з отриманням злитків для ОМТ або заготовок для виробництва виливків в вакуумних печах – механічна обробка заготовок. На відміну від такої складної технології знаходять застосування більш технологічні і економні методи порошкової металургії, що включають процеси: дроблення титанової губки – сортування отриманих порошків – пресування з них заготовок – спікання заготовок. Останній метод більш простий і економічний, але він має недоліки: висока вартість прес-форм і труднощі при отриманні виробів складної конфігурації.

У дисертації пропонується вирішення зазначеної проблеми, що полягає в розробці комплексної технології: «порошкова металургія – зварювання». Відповідно до цієї технології виріб складної конфігурації, наприклад, корпус вентиля, складається шляхом зварювання простих елементів, отриманих методами порошкової металургії в нескладних за конструкцією прес-формах. Переваги перед литтям і ОМТ запропонованої технології: зварювання відбувається на повітрі, КВМ становить близько 0,96.

Зварювання титану і його сплавів проблематичне в зв'язку з високою спорідненістю до кисню, азоту та водню, а також із пороутворенням у зварювальній ванні, з отриманням гартівних структур в зварному шві і зоні термомеханічного впливу (ЗТМВ), схильністю до гарячих і холодних тріщин. При цьому, методи зварювання тиском (такі, наприклад, як зварювання тертям і контактне зварювання) для титану та його сплавів мало досліджені, тим більше для спечених титанових сплавів.

На підставі аналізу існуючих рішень, проведеного в літературному огляді, сформульовано мету роботи, яка полягала в підвищенні механічних і службових

властивостей зварних з'єднань спечених титанових сплавів для виробів складної конфігурації, отриманих за комплексною технологією «порошкова металургія – зварювання», що працюють в агресивних середовищах. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- визначити оптимальний фракційний склад порошків і тиск пресування, що забезпечують необхідний рівень механічних і службових властивостей спечених заготовок;
- визначити шляхи підвищення механічних і службових властивостей виробів з титану, отриманих методом порошкової металургії і зварювання;
- дослідити вплив твердофазних способів зварювання на структуру і механічні властивості зварних з'єднань деталей, спечених з порошку титану;
- дослідити корозійну стійкість і електрохімічні характеристики зварних з'єднань зі спечених порошків титану, отриманих за розробленими режимами;
- провести натурні випробування отриманих виробів в промислових умовах;
- видати рекомендації промисловості.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріали і структурно-логічна схема роботи

Для отримання необхідної якості виробів визначали вплив на структуру, механічні та службові властивості спечених матеріалів наступних параметрів:

- гранулометричного складу шихти;
- тиску пресування;
- способів зварювання: а) тертям конвекційним, б) тертям переміщуванням, в) стиковим оплавленням.

Структуру цієї роботи приведено у вигляді комплексу дослідницько-технологічних заходів, які реалізовували відповідно до мети і завдань роботи (рис. 2.1). У літературному огляді (див. розділ 1) показано, що для виробів хімічної промисловості найбільш сприятливим сплавом з точки зору корозійної стійкості є нелегований титан марки ВТ1-0. Для виготовлення спечених виробів із порошків титану складу, близького до ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91), в якості шихтового матеріалу використовували промисловий термомеханічний порошок титану марки ПТ виробництва ДП «Державного науково-дослідного і проектного інституту титану», з різним фракційним складом, мм: -0,80+0,63; -0,63+0,45; -0,45+0,28; -0,28+0,10.

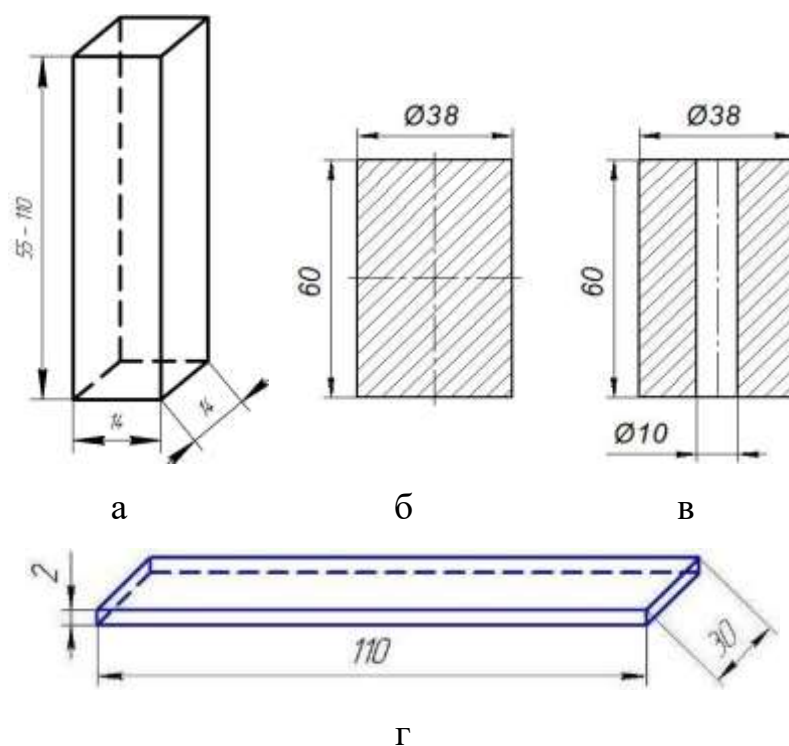
Дані порошкові матеріали широко використовуються для отримання спечених титанових сплавів на АТ «Мотор Січ». Перед формоутворенням з метою видалення вологи всі порошки проходили сушіння у спеціальній сушильній шафі або із залучанням вакуумної печі СНВЕ 1.3.1/16. Режими були обрані наступні: температура 300...320° С впродовж 60 хв. Такої температури повинно бути достатньо для випаровування вологи, а також для виведення вакуумною системою сполучень на основі водню, та зневоднення титану. Паралельно з цим проводили експеримент по сушінню порошків у аргоновому середовищі. Порошок в подальшому підлягав пресуванню і спіканню.



Рисунок 2.1 – Структурно-логічна схема досліджень зварних з'єднань спечених титанових сплавів

2.2 Виготовлення спечених зразків

У зв'язку з тим, що одним із завдань цієї роботи є вивчення впливу пористості пресованих заготовок на зварюваність, механічні та службові властивості пресування проводили із тиском від 300 МПа до 900 МПа. Заготовки різної геометрії (рис. 2.2) отримували шляхом формоутворення механічним одностороннім холодним пресуванням в сталевих прес-формах на гідравлічному пресі ДБ2432А з подальшим твердофазним спіканням та механічним обробленням до потрібних розмірів. Заготовки зразків для розривних і ударних випробувань мали форму паралелепіпедів (рис. 2.2, а), для досліджень властивостей зварних з'єднань – вид паралелепіпедів, циліндрів (рис. 2.2, а, б, в) і пластин (рис. 2.2, г).



а – паралелепіпед; б – циліндр суцільний; в – циліндр порожнистий;
г – пластина

Рисунок 2.2 – Ескізи заготовок після пресування

Спікання проводили в лабораторній вакуумній електropечі моделі

CHBE-1.3.1/16I₃ за наступним режимом: нагрів зі швидкістю $V_{\text{наг.}} = 20^{\circ} \text{ C/хв}$, ізотермічна витримка при температурі $1250^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$ протягом 180 хв, захисне середовище – вакуум 13,3 Па і охолодження зразків із піччю в вакуумі. Заготовки після спікання проходили сортування і калібрування.

Сортування зразків полягало у візуальному виявленні поверхневих дефектів після спікання. До поверхневих дефектів відносилися викривлення, відхилення від форми, відколи, тріщини. При їх наявності зразок відбраковувався.

За базу порівняння порошкових виробів обрано литий сплав BT1-0, отриманий вакуумно-дуговим переплавом з титанової губки ТГ-90 (ГОСТ 17746-96, ДСТУ 3079-95) в рамках спільних науково-дослідних робіт ЗНТУ та ДП «ЗТМК». Для скорочення кількості відходів і запобігання інтенсивного розігріву матеріалу, зразки для досліджень вирізали електроерозійним способом – металевою «струною» на верстаті ROBOFIL240SL, оснащеному приводом з числовим програмним управлінням.

2.3 Визначення хімічного складу спечених заготовок

Хімічний склад титану визначали спектральним методом з використанням приладу «SPECTROMAX» фірми «SPECTRO» за стандартними методиками відповідно до ГОСТ 19863.1-91...ГОСТ 19863.14-91. Вміст азоту і кисню визначали відповідно до ОСТ 190013, за допомогою газоаналізатора моделі ON900 фірми «ELTRA» на ДП «ЗТМК» в рамках спільних НДР.

Вміст елементів визначали якісним і кількісним методами. Розподіл елементів визначали на багатоцільовому растровому мікроскопі JSM-6360LA з приставкою для рентгеноспектрального енергодисперсійного аналізу JED 2200. Розподіл елементів по площі обраної ділянки визначали в режимі картування. На отриманих картах більша інтенсивність кольору відповідала більшому вмісту елемента [171].

2.4 Виготовлення зварних зразків

Зварні з'єднання отримували без застосування захисного середовища контактним стиковим зварюванням оплавленням, конвекційним зварюванням тертям та зварюванням тертям перемішуванням (рис. 2.3). Зварні з'єднання за першими двома методами отримували в лабораторіях кафедри «Обладнання та технології зварювального виробництва» Запорізького національного технічного університету, на АТ «Мотор Січ» і в Інституті електрозварювання НАН України, за останнім – в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України в рамках спільних науково-дослідницьких робіт.

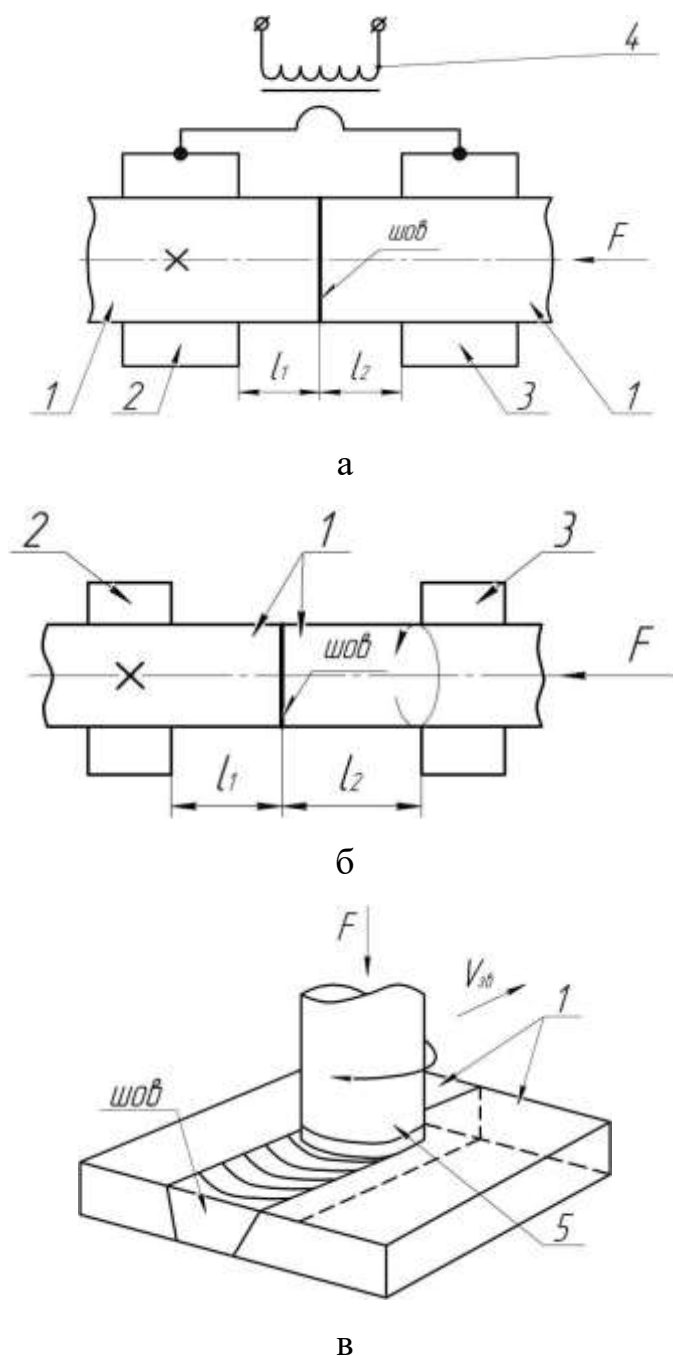
2.4.1 Контактне стикове зварювання оплавленням

Контактне стикове зварювання оплавленням виконувалося на машині МСО-750. Дослідження впливу режимів контактного стикового зварювання оплавленням на структуру і механічні властивості здійснювали на циліндричних зразках суцільного перерізу діаметром 10...12 мм і діаметром 38 мм. Режими зварювання: тиск осадки $p_{oc} = 50$ МПа, щільність струму оплавлення $I_{опл} = 15$ А/мм², щільність струму осадження $I_{oc} = 30$ А/мм².

2.4.2 Зварювання тертям конвекційне

Зварювання тертям конвекційне виконувалося на машинах МСТ-2 і МФ-362. Дослідження впливу режимів конвекційного зварювання тертям на структуру і механічні властивості проводили на циліндричних зразках суцільного

перерізу діаметром 10...12 мм і діаметром 38 мм. Режими зварювання: тиск нагріву 10...30 МПа, час нагріву 1,3...5,3 с; частота обертання 23,83 с⁻¹.



1 – деталі, що зварюють; 2 – нерухомий зажим; 3 – рухомий зажим;
4 – зварювальний трансформатор; 5 – зварювальний інструмент;

F – зусилля, що стискає; l – виліт деталі

а – контактне стикове зварювання опаленням; б – зварювання тертям конвекційне; в – зварювання тертям перемішуванням

Рисунок 2.3 – Схеми використовуваних способів зварювання

2.4.3 Зварювання тертям перемішуванням

Зварювання тертям перемішуванням виконувалося на дослідній машині. Дослідження впливу режимів зварювання на структуру і механічні властивості здійснювали на спечених зразках у вигляді пластин (див. рис. 2.2, г). Режими зварювання: швидкість зварювання 0,33 см/с; частота обертання інструменту 330 c^{-1} .

2.5 Дослідження структури

Дослідження структури проводили металографічним; електронно-мікроскопічним і рентгенографічним методами. Зразки для металографічних досліджень готували послідовним шліфуванням і поліруванням. Травлення шліфів здійснювали в реактиві складу: HF – 10 мл, HNO₃ – 25 мл, гліцерин – 65 мл. Мікроструктурний аналіз проводили з використанням інвертованого мікроскопу відбитого світла (фірма «Carl Zeiss»).

2.6 Фрактографічний аналіз поверхні руйнування

При оцінці характеру руйнування зразків після випробувань на розтягання застосовували фрактографічний метод на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И. Для визначення характеру руйнування застосовували фрактографічний атлас титанових сплавів [172].

2.7 Кількісна оцінка мікроструктури

Кількісну оцінку мікроструктурних складових і пор проводили за стандартною методикою (ГОСТ 1778-70). Довжина підрахунку становила 10 мм, точність $\pm 10 \%$.

2.8 Оцінка пористості і усадки

Розрахунок об'ємної частки пор Θ проводили за формулою [173]:

$$\Theta = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{L_0}, \quad (2.1)$$

де l_i – довжина відрізка, який проходить через i -ту пору;

L_0 – сумарна довжина випадкових січних ліній;

n – кількість пор на лінії L_0 .

Абсолютна похибка у визначенні об'ємного вмісту структурної складової обчислювалася за формулою:

$$\delta_V = K \cdot t \sqrt{\frac{V(100-V)}{z}}, \quad (2.2)$$

де K – коефіцієнт, що залежить від характеру структури і від однорідності одержуваних відрізків по довжині (приймають за 1; за умови рівномірного розподілу рівновісних частинок – 0,65);

t – нормоване відхилення (використовують $t = 0,6745$);

z – загальне число виміряних при аналізі відрізків.

Густину зразків визначали за ГОСТ 25281-82 розрахунковим методом. Істинну або загальну пористість отримали за формулою:

$$P_{ict} = \frac{\rho_{ict} - \rho_{уяв}}{\rho_{ict}} \cdot 100\% = \left(1 - \frac{\rho_{уяв}}{\rho_{ict}} \right) \cdot 100\%, \quad (2.3)$$

де ρ_{ict} – істинна густина, для сплаву ВТ1-0 $\rho_{ict} = 4,505 \text{ кг/м}^3$ [73];

$\rho_{уяв}$ – уявна густина – густина, яка отримана шляхом вимірювання розмірів зразка та його зважуванням.

Підрахунок усадки при спіканні проводили за формулою:

$$Y = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \cdot 100, \quad (2.4)$$

де h_0 та h_1 – лінійний розмір зразка до спікання та після спікання відповідно, мм;

2.9 Механічні властивості

Випробування дослідних матеріалів при статичних навантаженнях і розрахунок значень межі міцності проводили відповідно до ГОСТ 18227-85 на плоских і циліндричних механічно оброблених зразках типу III №7 ГОСТ 1497-84. Використовували розривну машину моделі IP 100-0.

Визначення межі міцності найбільш слабкої ділянки зварного з'єднання проводили на плоских і циліндричних зразках рівного геометричного перерізу типу XII за ГОСТ 6996-66. При випробуванні фіксували місце руйнування зразка (по металу шву, колошовної зони, по основному металу). Посилення зварного шву на зразках знімали механічним способом до рівня основного металу.

Ударну в'язкість визначали за ГОСТ 26528-98 на зразках порошкових матеріалів у вигляді штабиків квадратного перерізу $10 \text{ мм} \times 10 \text{ мм} (\pm 0,2 \text{ мм})$

довжиною $55 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$. Твердість дослідних сплавів визначали стандартним методом Бринеля (ДСТУ ISO 6506-1:2007). Вимірювання мікротвердості проводили згідно ДСТУ ISO 6507-1:2007 при навантаженні у 0,49 Н.

2.10 Корозійна стійкість і електрохімічні властивості

Дослідження корозійної стійкості проводили стандартним гравіметричним методом (ГОСТ 9.908-85, ДСТУ 3830-98). В якості робочого середовища використовували 20 % і 40 % розчини HCl (ГОСТ 3118-77) і H_2SO_4 (ДСТУ ГОСТ 2184:2018), за температурою 20°C і базою випробувань 24, 48 і 100 год (ДСТУ EN ISO 7539-1:2015). Зразки зважували з точністю $\pm 0,1 \text{ мг}$. Швидкість корозії підраховували за формулою:

$$V_k = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau} \quad (2.5)$$

де Δm – різниця маси зразка до корозії і маси зразка після корозії, г;

S – площа поверхні зразка, мм^2 ;

τ – час витримки в агресивному середовищі, год.

Продукти корозії видаляли хімічним методом згідно з ДСТУ EN ISO 7539-1:2015. Електрохімічне випробування на титанових електродах (досліджувані зразки титану) здійснювали з використанням потенціостату IPC-Pro в потенціодінамічному режимі. Для потенціостата використовували програму IPC2000, яка обслуговує програмно-апаратний комплекс «Потенціостат IPC-Pro + ЕОМ». Експерименти проводилися за допомогою триелектродного скляного осередка (50 мл) з платиновим електродом і насиченим Ag/AgCl електродом порівняння. Поверхню робочого електрода з титанового сплаву покривали хімічно стійким лаком ХС-75, залишаючи місце

площею 1 см^2 для витримки в електроліті. Після занурення зразка в розчин, зміну потенціалу в часі вимірювали протягом 1 год з інтервалом 0,5 с. Поляризаційні криві знімали в області потенціалів $-1,0 \dots 1,5 \text{ В}$ при швидкості розгортки потенціалу 2 мВ/с . Потенціал корозії і струм корозії визначали графічним методом екстраполяції Тафеля, використовуючи поляризаційні криві. Експеримент повторювали принаймні три рази для кожного зразка.

2.11 Обробка експериментальних даних

Обробку експериментальних даних виконували відповідно зі стандартними методами [174]. Отримані експериментальні дані обробляли статистично, визначаючи середньоквадратичне відхилення S і величину довірчого інтервалу ΔX :

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}, \quad (2.6)$$

$$\Delta X = \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot t, \quad (2.7)$$

де n – число вимірів;

$\bar{X}$ – середнє значення показника властивостей;

X_i – значення вимірюваного показника;

t – критерій Стюдента при довірчій ймовірності $\alpha = 95 \%$.

Похибки для вимірюваних величин склали: $\pm 0,4 \%$ – для межі міцності, подовження і звуження; $0,7 \%$ – для значень твердості, $5 \cdot 10^{-2} \text{ г/(м}^2 \cdot \text{год)}$ – для швидкості корозії.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ПОРОШКОВИХ ВИРОБІВ З ТИТАНУ

3.1 Технологія виготовлення зразків

Титан і його сплави, як конструкційні матеріали, мають комплекс позитивних характеристик у порівнянні з іншими металами і сплавами. При цьому широке застосування титанових сплавів стримується відносно високою вартістю їх отримання внаслідок складної технології отримання титанової губки та необхідністю її вакуумних переплавів.

Для зниження собівартості продукції з титану та сплавів на його основі ефективним рішенням є отримання деталей з порошків [175, 176, 177, 178, 179].

Найбільш економними методами отримання виробів з титану та його сплавів є порошкові технології. Так у ряді робіт Шаповалової О.М. [180, 181, 182], Івасішина О.М. [183, 184], показано, що при використанні порошкових технологій при виробництві деталей з титану та його сплавів коефіцієнт використання матеріалу збільшується понад 50% і досягає 0,95. Автори цих же робіт показали, що найбільш вигідним з економічної точки зору є метод прямого холодного ущільнення порошків титану та легувальних елементів з ізотермічним відпалом сформованої геометрії напівфабрикату. При цьому, в роботах Павленка Д.В. [185, 186, 187] збільшення економічного ефекту при використанні порошків титану, досягається впровадженням у виробництво порошків титану марок ПТ, що є прямим продуктом при подрібненні титанової губки перед її багаторазовим переплавом.

Виходячи з вище викладеного, в даній роботі досліджували і оптимізували технологічні процеси отримання виробів з титану методами порошкової металургії. У зв'язку з тим, що властивості порошкових виробів визначаються в першу чергу тиском пресування і фракційним складом (розміром) порошків, вивчали вплив цих факторів на розмір і кількість пор в дослідних зразках, а також

на механічні властивості спечених пресовок.

При дослідженні морфології частинок порошку (рис. 3.1), застосовуваного для синтезу спечених заготовок, встановлено, що вони мали розвинену поверхню, характерну для титану губчатого, що позитивно позначається на здатності до пресування та наступного спікання. Порошок характеризується неправильною, кутастою і осколковою формою.



Рисунок 3.1 – Макроструктура частинки порошку титану марки ПТ

Для виготовлення дослідних зразків треба обирати таку їх геометрію, яка буде враховувати низку параметрів. По-перше, дослідні зразки для визначення технологічних властивостей порошкових заготовок повинні бути мінімально матеріалоемними. По-друге, розмір зразків повинен максимально враховувати масштабний фактор. По-третє, технологічне оснащення для виготовлення дослідних зразків повинно враховувати технологічні можливості лабораторії. Виходячи із зазначеного, досліджували зразки типу паралелепіпед розмірами 14 мм × 14 мм × 110 мм (див. розділ 2, рис. 2.2, а), зручні для проведення механічних і металографічних досліджень. Відповідно до плану експерименту було виготовлено 28 варіантів зразків: чотири фракції порошків титану (табл. 3.1) спресовано кожна під тиском 300 МПа, 400 МПа, 500 МПа, 600 МПа, 700 МПа, 800 МПа і 900 МПа.

Нижню межу розміру порошинок встановили 0,1 мм, виходячи з того, що при більш низьких розмірах кількість домішок в них згідно ТУ У 14-10-026-98, виходить за рамки допустимих значень для технічного титану марки ВТ1-0 (ГОСТ 19807- 91). Верхня межа розміру порошку прийнята 0,83 мм, тому що використання порошинок більшого розміру не призводить до помітного зниження кількості домішкових елементів. Крім того, зі збільшенням розміру фракції збільшується поруватість одержуваних заготовок, що веде до зниження їх механічних властивостей або необхідності підвищення тиску пресування.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад порошку титану марки ПТ, згідно ТУ У 14-10-026-98, % мас

Фракція порошку, мм	Ti	Fe	O	N	Cl	Si	C
-0,80+0,63	основа	0,02...0,07	0,03...0,06	0,02...0,03	0,05...0,07	0,005...0,01	0,01...0,02
-0,63+0,45	основа	0,03...0,07	0,04...0,06	0,02...0,03	0,05...0,08	0,01...0,02	0,01...0,02
-0,45+0,28	основа	0,04...0,09	0,05...0,07	0,03...0,04	0,06...0,08	0,01...0,02	0,01...0,02
-0,28+0,10	основа	0,08...0,10	0,06...0,08	0,03...0,04	0,06...0,08	0,03...0,04	0,02...0,03

Встановлено, що збільшення фракції порошку титану призводило до зменшення вмісту кисню. Так різниця в показниках складала приблизно 10 %. Аналогічні закономірності встановлено і для інших домішкових елементів. При цьому, як показано в роботі [188, 189], при спіканні може проходити очищення поверхонь частинок порошку від супровідних домішок. Треба зазначити, що технічний титан або сплав ВТ1-0 є наслідком багаторазового переплаву титанової губки, взятої з центральних та периферійних частин блоку титану губчатого. Порошок титану, марки ПТ, що використовувався у дослідженнях, є наслідком механічного подрібнення блоку титану губчатого, тому доцільно вважати, що використання такого порошку повинно призвести до отримання сплаву титану ВТ1-0.

Дослідженнями хімічного складу порошку після сушіння в вакуумі та порошоків у аргоновому середовищі було встановлено, що істотного поліпшення хімічного складу не відбувалося. Це, напевно, було наслідком того, що волога і водень при виділенні з поверхонь частинок порошку залишалися у газовому середовищі та при охолодженні знову потрапляли у сполуки та титановий порошок. Також слід зауважити, що вартісність цього процесу підвищується на затрати на аргон. Беручи до уваги складне становище у сферах постачання газу, було прийнято і рекомендовано надалі проводити сушіння порошоків титану у вакуумі. Це дозволить вилучати вологу і водень та виводити їх з об'єму камери.

Нижню межу тиску пресування встановили 300 МПа. Виходячи з результатів аналізу літературних даних (див. розділ 1) при більш низьких значеннях не досягається потрібна міцність спечених пресовок. Верхню межу тиску пресування прийняли 900 МПа, тому що подальше збільшення тиску практично не має значного впливу на відносну густину, але веде до підвищеного зношування пресової оснастки і збільшення енерговитрат обладнання. Всі зразки, незалежно від зусилля пресування, формували в автоматичному режимі, що надало змогу максимально зменшити вплив людського фактору на якість заготовок. При цьому, налагодження обладнання проводилося одним і тим же працівником. При пресуванні всіх зразків, оператором установлювалося зусилля (тиск) пресування, що контролювалося за манометром. За показами манометра проводили уточнення режиму пресування.

Процеси спікання проводили у лабораторній електропечі СНВЕ 1.3.1/16, кафедри «Механіка» ЗНТУ. Режими спікання були однакові і складали: температура спікання 1250° С та ізотермічна витримка впродовж 180 хв. Такі режими спікання обрано з міркувань раціоналізації енерговитрат на відпал. Такі ж режими використовувалися для досліджень [190] і визначалися, як достатні для формування порошкових структур високої якості.

Зі спечених заготовок вирізали зразки для металографічного аналізу, визначення розміру та об'ємної частки пор і механічних випробувань для подальшого порівняння з литими та деформованими заготовками зі сплаву ВТ1-0.

Токарну обробку проводили на режимах для чистового точіння, щоб мінімізувати можливе зародження тріщини в порах, що мають великі розміри. Режими для всіх зразків були однаковими.

Перед формоутворенням усі фракції порошоків, що досліджувалися проходили вимірювання насипної щільності за ГОСТ 19440-94. При цьому було встановлено, що насипна щільність не перевищувала $1,8 \text{ г/см}^3$ для порошоків, фракції більше 0,28 мм. Вимірювання показнику насипної щільності для порошоків, фракціями менших розмірів показало, що ці порошки не «течуть» і вимірювання здійснити неможливо. Такі тенденції встановлено при обох методах вимірювання: методом використання воронки Холла та методом волюметра Скотта.

Дослідженнями хімічного складу було встановлено, що хімічно зразки із спеченого титану були аналогічні зразкам з технічного титану BT1-0, отриманого за технологією лиття (табл. 3.2). З аналізу даних таблиці 3.2 видно, що для спечених зразків вміст кисню складав до 0,20 % мас. Вміст заліза у спечених зразках не перевищував 0,22 % мас. Згідно з ТУ У 14-10-026-98, вміст заліза знаходився у межах вимог для спечених зразків всіх фракцій.

Таблиця 3.2 – Хімічний склад зразків, % мас.

Стан	Ti	Si	Fe	O	H	N	C	Сума інших домішок
Спечений зразок	основа	$\leq 0,05$	$\leq 0,22$	$\leq 0,20$	$\leq 0,009$	0,030... 0,035	$\leq 0,06$	$\leq 0,19$
BT1-0 ГОСТ 19807-91	основа	$\leq 0,10$	$\leq 0,25$	$\leq 0,20$	$\leq 0,010$	$\leq 0,04$	$\leq 0,07$	$\leq 0,30$

Незважаючи на збільшений вміст деяких домішок (кисень, водень) у порошок титану, використані порошкові технології отримання деталей з титану не призводять до їх збільшення. Це пов'язано із тим, що при спеченні

використовується глибокий вакуум. Досягається $13,3 \times 10^{-3}$ МПа. Натікання при вакуумному відпалі значно менші ніж при переплаві титану губчатого, бо використовується обладнання значно менших розмірів та енерговитрат. Але початкова концентрація цих елементів дещо збільшена у порівнянні з концентрацією їх же, але у литому титані ВТ1-0. Це обумовлено технологією виготовлення порошків титану, марок ПТ. Збільшення вмісту заліза є наслідком технології отримання порошку титану та хімічної взаємодії титанової губки з ретортою під час відновлення титану. В цілому, використання центральної частини (крична частина блоку) дозволяє мінімізувати насичення блоку титану губчатого домішками у порівнянні з периферійними частинами блоку.

3.2 Аналіз впливу фракції порошку і тиску пресування на структуру спечених зразків

Як зазначалося вище, дослідження проводили на спечених зразках титанового сплаву ВТ1-0, отриманого за технологією порошкової металургії при різних зусиллях пресування.

Було встановлено, що в зразках, отриманих пресуванням під тиском 300 МПа і 400 МПа, мало місце осипання нижньої кромки (рис. 3.2) внаслідок непропресованості заготовки. Це можна пояснити слабким зчепленням між порошинками внаслідок недостатнього тиску пресування. Поясненням цьому є загальноприйнята теорія: матеріал з порами, що розглядається як одне суцільне тіло, має властивості, котрі залежать від структурної неоднорідності та складу порошкової суміші [191, 192, 193]. При цьому, існують залежності, що поєднують контактне зусилля з площею контакту [194, 195]. Тому для досягнення компактності зразка без руйнування його кромки для кожного матеріалу є мінімальне необхідне значення зусилля пресування [196, 197].

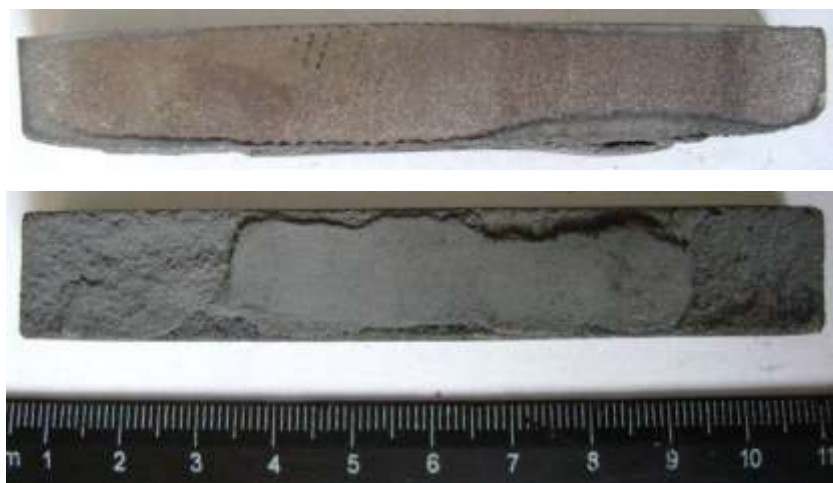


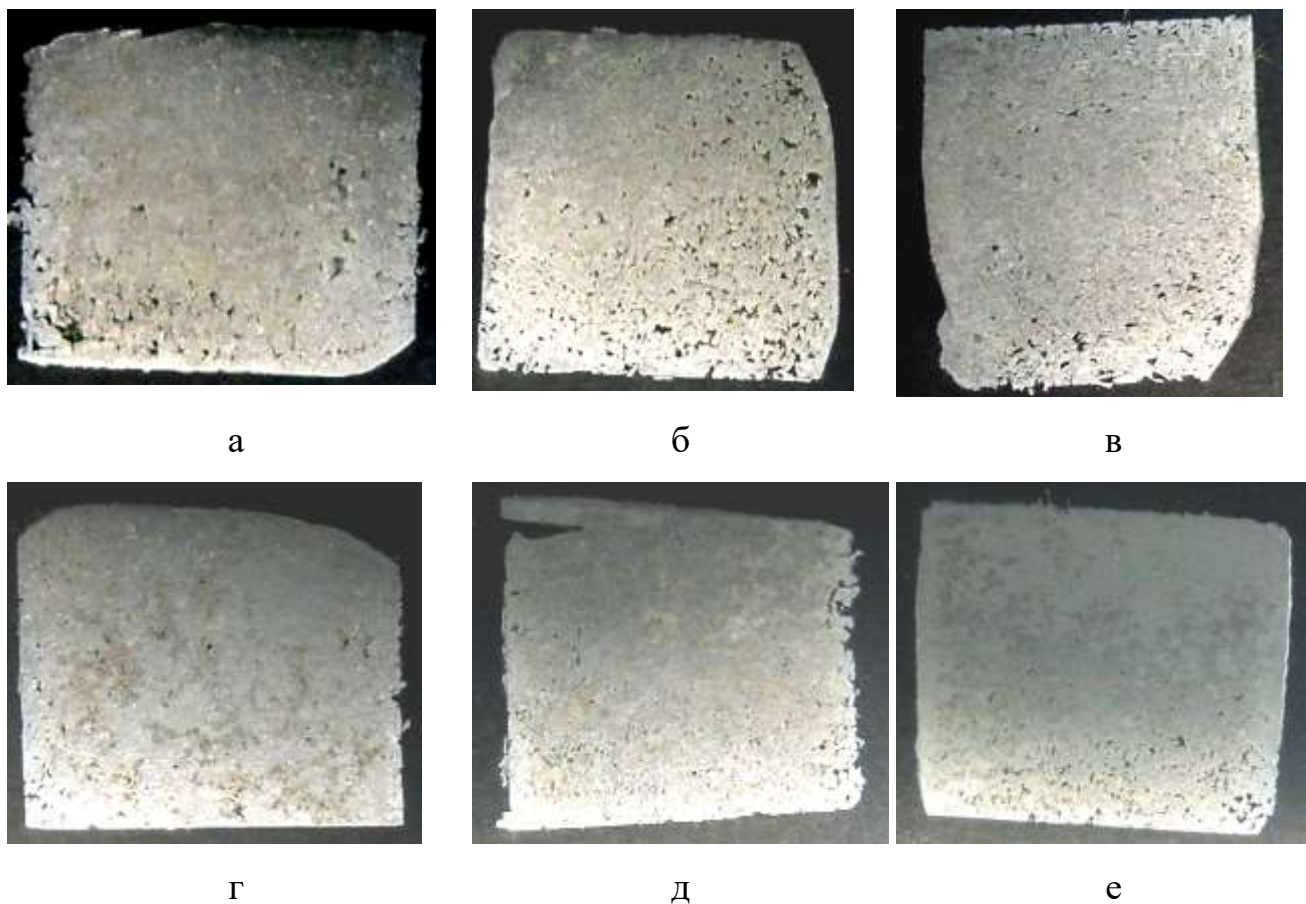
Рисунок 3.2 – Зовнішній вид спеченого зразка з нижньою кромкою, яка осипалась

З аналізу даних рисунка 3.2 виходить, що отримана поверхня кромки, а саме частинка заготовки, що осипалась є наслідком невідповідності зусилля тиску при пресуванні. Таким чином, ілюстрована на рисунку 3.2 поверхня зразка є доказом того, що для зразків, розміром $14 \text{ мм} \times 14 \text{ мм} \times 110 \text{ мм}$, зусилля пресування у 300 МПа, 400 МПа є недостатнім. Основною відмінністю інших зразків є відсутність кромки, що осипалися. Такий вид зразків надає можливість зробити висновок про достатність тиску пресування для формування якісної спеченої заготовки. Більш детальні дослідження перерізу зразків, отриманих пресуванням на різних зусиллях, наведено на рисунку 3.3.

У нижній частині зразків, отриманих при тиску 500 і 600 МПа спостерігалася підвищена концентрація пор, при цьому їх розміри і кількість знижувалися зі зменшенням фракції порошку (рис. 3.3, а, б, в), а також зі збільшенням тиску пресування (рис. 3.3, г, д, е).

Однак, з аналізу ілюстрацій на рисунку 3.3 видно, що концентрації пор на периферії є неоднорідними. Тобто, можна побачити, що існують периферійні зони у яких мають місце пори. Їх розмір і кількість значно зменшуються при наближенні до центрів зразків. Це пов'язано зі схемою пресування зразків: одностороннє пресування дозволяє отримувати максимальну щільність матеріалу у центрі та мінімальну на периферії його площі поперечного перерізу. Такі

закономірності також встановлено у роботах Петрова А.І. [198]. Частина периферії спеченого зразка з максимальним вмістом пор у дослідженнях механічних властивостей не приймала участі – її було механічно видалено.



а – 500 МПа, $-0,45+0,315$ мм; б – 500 МПа, $-0,63+0,45$ мм; в – 500 МПа, $-0,80+0,63$ мм; г – 600 МПа, $-0,45+0,315$ мм; д – 600 МПа, $-0,63+0,45$ мм; е – 600 МПа, $-0,80+0,63$ мм

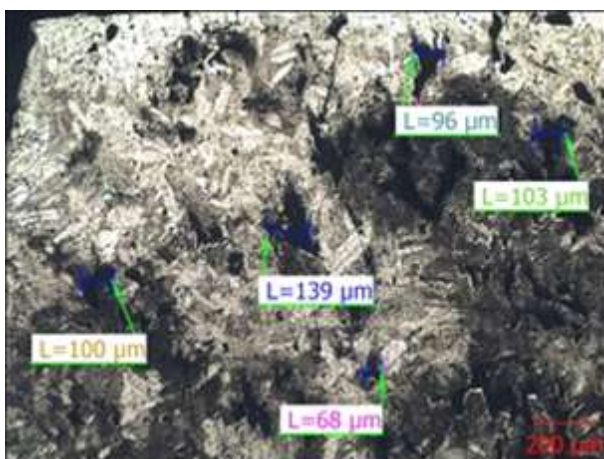
Рисунок 3.3 – Макроструктура спечених зразків, які пресували при тисках 500 МПа і 600 МПа

Слід зауважити, що переріз зразків, отриманих формоутворенням при 700...900 МПа містять меншу кількість пор. При цьому розміри пор значно зменшуються, відсутня концентрація пор на периферії зразка. Найбільш великий ефект впливу зусилля пресування на пористість досягається при формоутворенні за 900 МПа. На цих зразках відмічена найбільша суцільність перерізу. Але формування зразків при 900 МПа і більше спряжено з рядом негативних факторів,

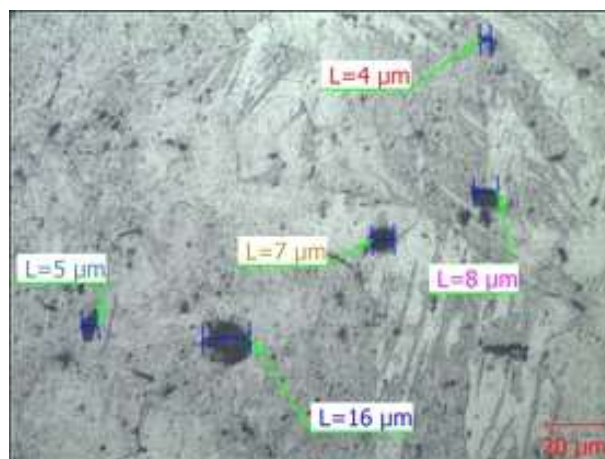
що здорожують технологію. До цих факторів можна віднести необхідність використання потужних пресів (значне підвищення ресурсозатратності та необхідність використання більш кваліфікованого персоналу), збільшений знос обладнання та штампів. Вирішення зазначених факторів спряжене з необхідністю переобладнання виробництв, розробкою принципово нових матеріалів для штампів та пуансонів, використанню змащувальних матеріалів у парі тертя порошок – оснастка. Наприклад, використання змащувальних матеріалів у парі тертя з порошком, призведе до погіршення умов спікання заготовок. Чим більше засмічений зразок, тим більше часу необхідно на дегазацію виробу. Ряд змащувальних матеріалів (наприклад, дисульфід молібдену) призводить до виходу із строю вакуумних насосів через окислення мастила. До того ж змащувальні матеріали при формоутворенні залишаються у закритих міжчастинкових порах і при спіканні сприяють виникненню пустот, що будуть заповнені ними, а також можуть погіршувати хімічний склад суміші.

Рисунки 3.4, 3.5 і 3.6 ілюструють вплив тиску пресування і розміру зерен порошку на пористість зразків після спікання при температурі $1250^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ протягом 3 год. Методом випадкових січних (див. п. 2.7) було підраховано об'ємну частку пор в зразках із різною крупністю порошків (табл. 3.3).

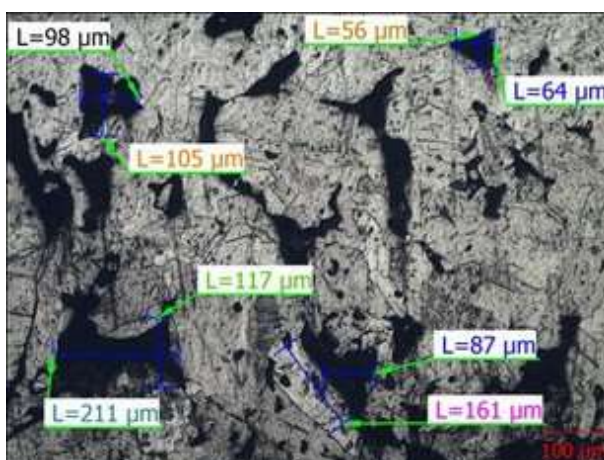
Так, розмір найкрупніших пор для порошку фракції $-0,45+0,28$ мм при тиску пресування 500 МПа склав близько 140 мкм, при цьому спостерігалися пори, розміром 70 мкм (див. рис. 3.4, а). Для фракції $-0,63+0,45$ мм при формоутворенні з зусиллям пресування 500 МПа найбільший розмір пор був 211 мкм. Мали місце і пори малих розмірів – до 56 мкм. Для фракції $-0,80+0,63$ мм найбільший розмір пор – 303 мкм. Пори відносно малих розмірів, а саме до 87 мкм також присутні. В цілому видно, що в усіх випадках, розмір зерен є більшим за розміри пор. Однак, для фракції $-0,80+0,63$ мм розмір зерен перевищує розмір пор на 50 %. Це можна пояснити тим, що при зменшенні розміру частинок порошку при пресуванні відбувається поліпшення компактування, а тиск пресування значно збільшує компактність вже найбільш компактної (у порівнянні з іншими фракціями, що досліджувалися) формовки.



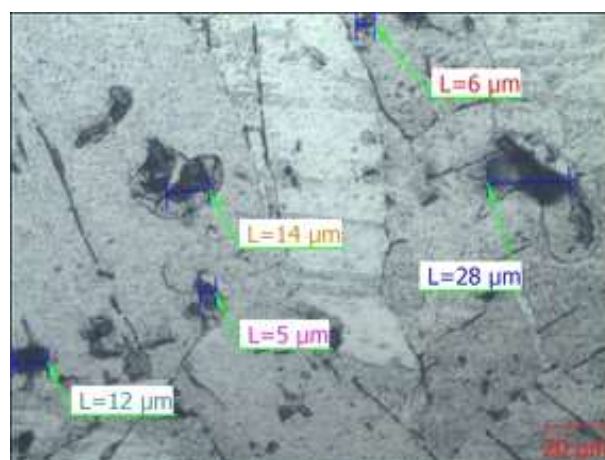
а



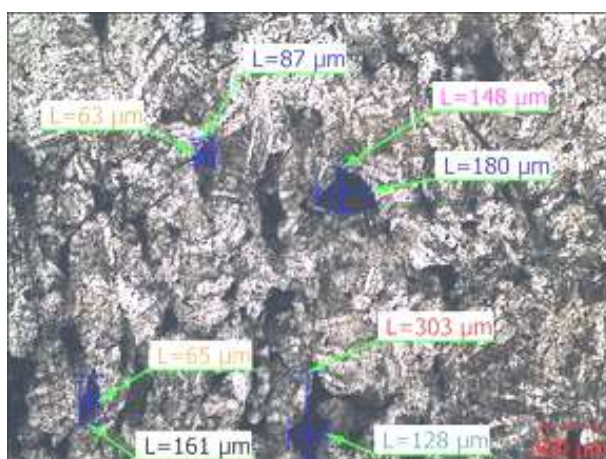
б



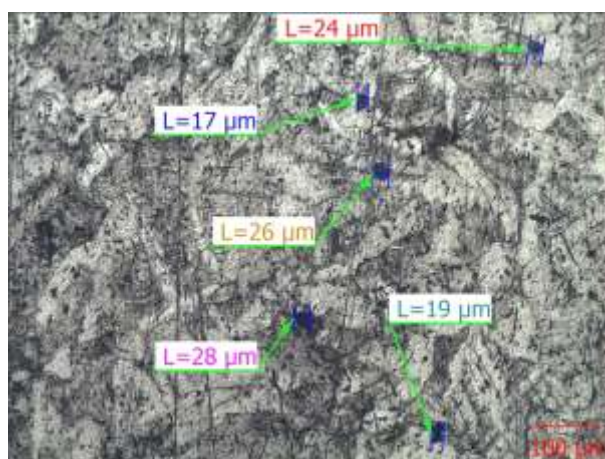
в



г



д



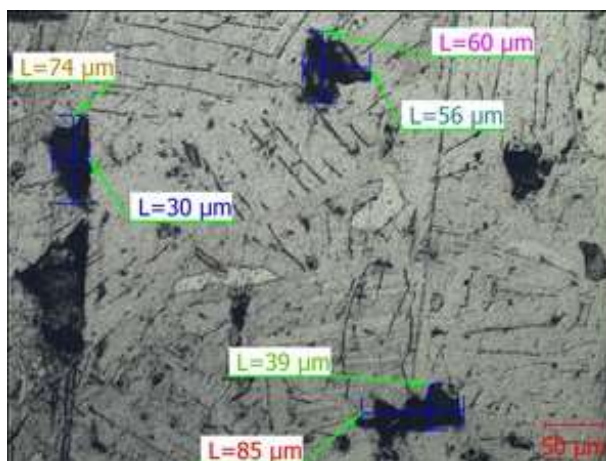
е

а, б – $-0,45+0,28$ мм; в, г – $-0,63+0,45$ мм; д, е – $-0,80+0,63$ мм

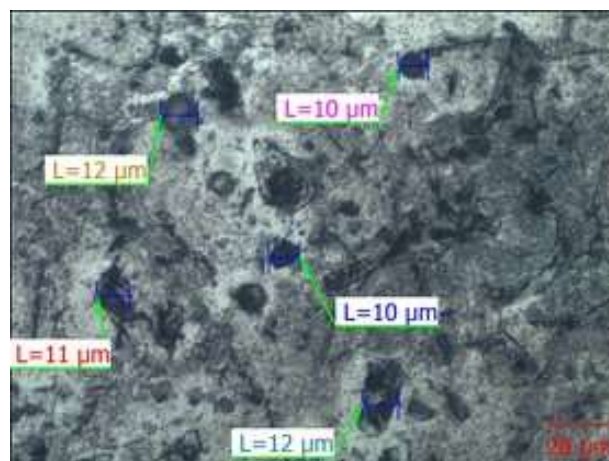
а, в, д – периферійна зона; б, г, е – центральна зона

L – максимальний лінійний розмір пори $d_{\text{пор. max}}$ (див. табл. 3.3)

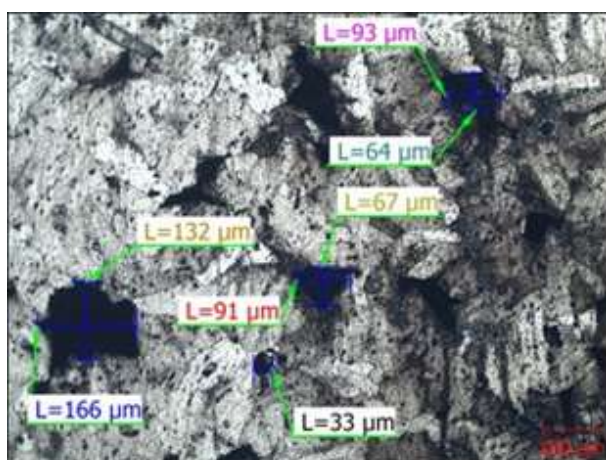
Рисунок 3.4 – Мікроструктури спечених заготовок з різним фракційним складом порошків (тиск пресування 500 МПа)



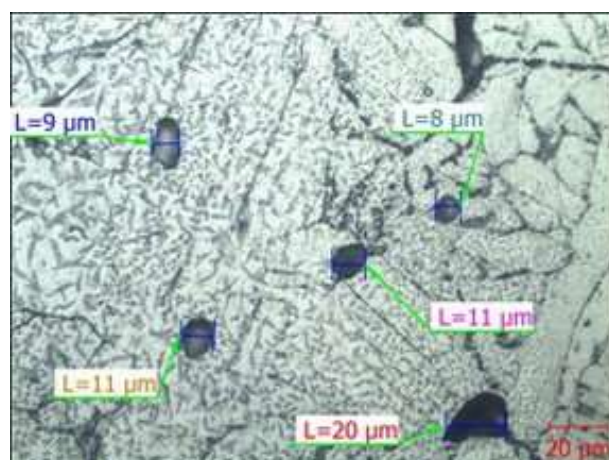
а



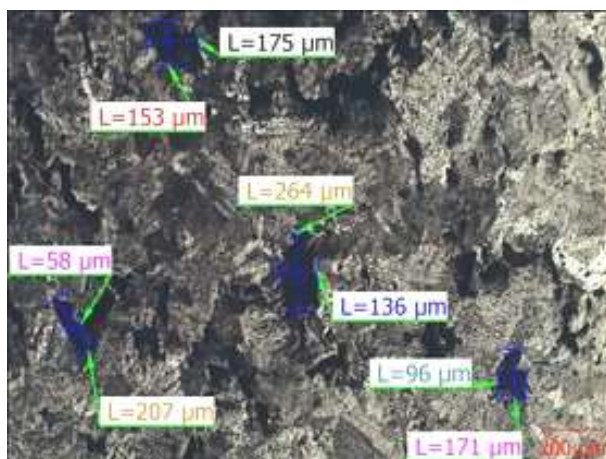
б



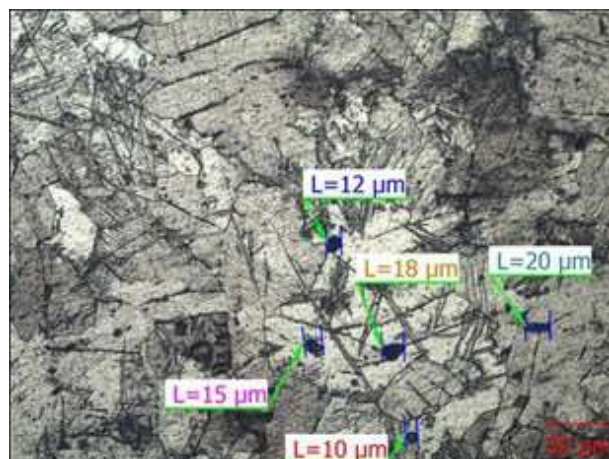
в



г



д



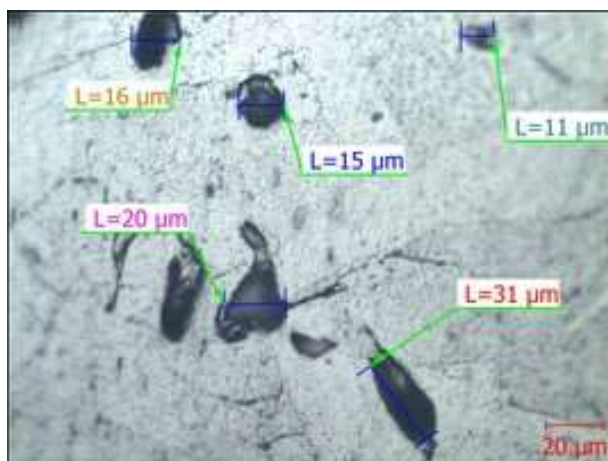
е

а – $-0,45+0,28$ мм; б – $-0,63+0,45$ мм; в – $-0,80+0,63$ мм

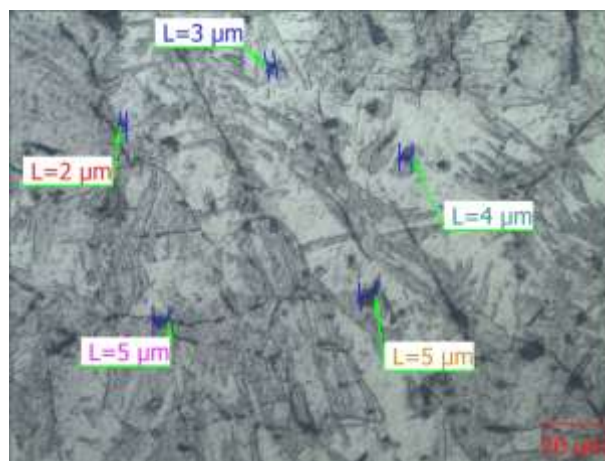
а, в, д – периферійна зона; б, г, е – центральна зона

L – максимальний лінійний розмір пори $d_{\text{пор. max}}$ (див. табл. 3.3)

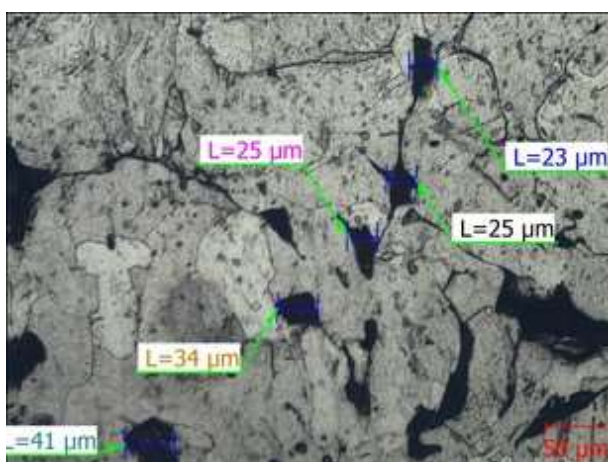
Рисунок 3.5 – Мікроструктури спечених заготовок з різним фракційним складом порошків (тиск пресування 700 МПа)



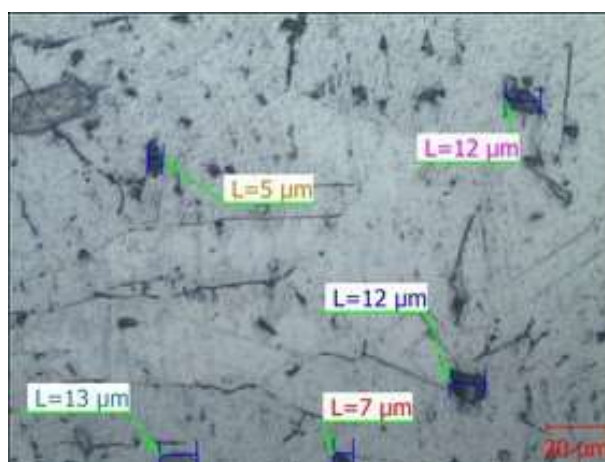
а



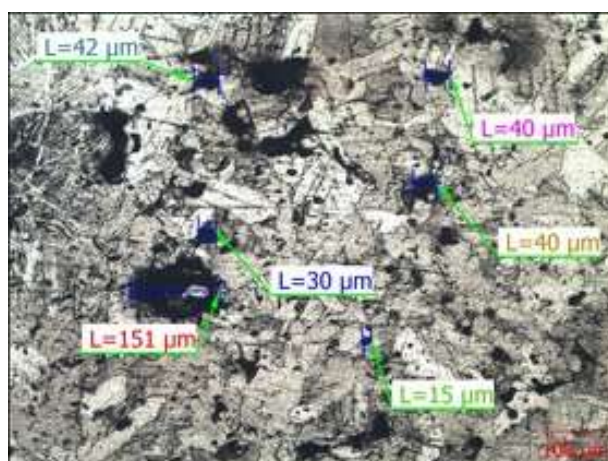
б



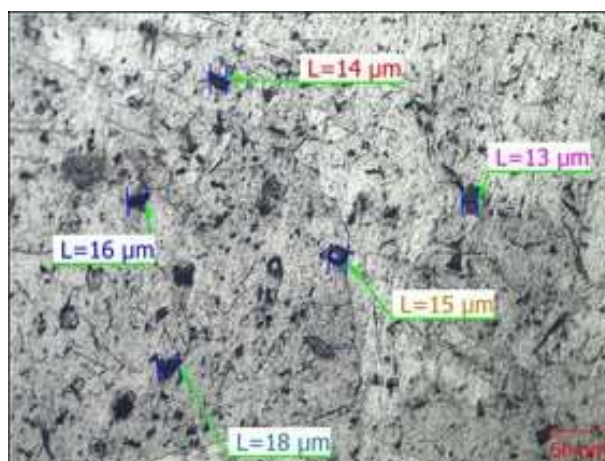
в



г



д



е

а – $-0,45+0,28$ мм; б – $-0,63+0,45$ мм; в – $-0,80+0,63$ мм

а, в, д – периферійна зона; б, г, е – центральна зона

L – максимальний лінійний розмір пори $d_{\text{пор. max}}$ (див.табл. 3.3)

Рисунок 3.6 – Мікроструктури спечених заготовок з різним фракційним складом порошків (тиск пресування 900 МПа)

Таблиця 3.3 – Характеристики спечених зразків з технічного титану

№ п/п	Технологічні фактори		Характеристики		
	Фракція порошку, мм	Тиск пресування Р, МПа	Об'ємна частка пор Θ, %	Максимальний розмір пор d _{пор. max} , мкм	Середній розмір пор d _{пор} , мкм
1.	-0,80+0,63	500	33	303	120
2.		600	24	290	105
3.		700	15	264	90
4.		800	10	210	77,5
5.		900	7	151	68
6.	-0,63+0,45	500	28	211	95
7.		600	18	195	80
8.		700	10	166	67,5
9.		800	7	118	55
10.		900	5	41	45
11.	-0,45+0,28	500	23	140	67,5
12.		600	14	113	50
13.		700	7	85	40
14.		800	5,5	60	34,5
15.		900	4,5	31	30
16.	-0,28+0,10	500	17,9	100	46
17.		600	11,2	87	32,5
18.		700	6,9	66	27,5
19.		800	5	42	24
20.		900	3,8	25	21

Аналогічні закономірності по зменшенню розміру пор відображаються на структурах рисунка 3.5. Однак, порівняно з рисунком 3.4, по всіх фракціях відмітним є ефект поліпшення структури за рахунок зменшення розмірів пор. Збільшення зусилля пресування дозволяє суттєво зменшити розміри пор однієї й

тієї ж фракції до 2 разів. Однак для фракції $-0,45+0,28$ мм цей ефект є менш вираженим. Зменшення розміру пор відбулося в середньому на 30 мкм.

Згідно даних рисунка 3.6 при збільшенні зусилля пресування до 900 МПа призводить до ще більшого ефекту зменшення розмірів пор. Кількість пор, що оцінено по мікроструктурам рисунків 3.4 – 3.6 при збільшенні зусилля пресування, зменшувалась.

Аналізом рисунків 3.4 – 3.6 було встановлено, що металева складова структури спечених зразків, незалежно від фракційного складу порошків титану, практично не змінювалась. Металева складова структури, незалежно від зусилля пресування та фракції порошку, була представлена зернами α -фази з чіткими міжчастинковими границями. Розмір зерна змінювався в залежності від розміру фракції та величини зусилля пресування. Це можна пов'язати з відомим механізмом формування зернової структури у металах при спіканні. Відповідно до теорій спікання [199, 200], формування пористості проходитиме при пресуванні частинок порошку у місцях їх контакту. Саме частинками порошку металу визначається розмір пустот між цими частинками та їх форма. Частинка порошку є окремим тілом зі своєю структурою, вона може мати декілька зерен, або одне, розмір котрого не перевищуватиме розміру частинки. Стосовно порошку титану, що використовувався, то він є подрібненою титановою губкою, що має подібну до дендритної структури будову. Саме така будова та підвищена насиченість домішками-супутниками дозволяє при механічному подрібненні блоку титану губчатого формувати порошок різної фракції.

При підвищенні температури, у місці взаємодії частинок порошку проходила дифузія. Аналогічні процеси відбувалися і на границях зерен у межах частинки порошку. Саме це обумовило різницю у розмірах зерен. Висока температура та надана пресуванням залишкова енергія призводили до перемішування границь зерен і поглинання ними пор, що мали менші розміри. Таке перемішування супроводжувалося вибігом пор на периферію зразка – проходила усадка.

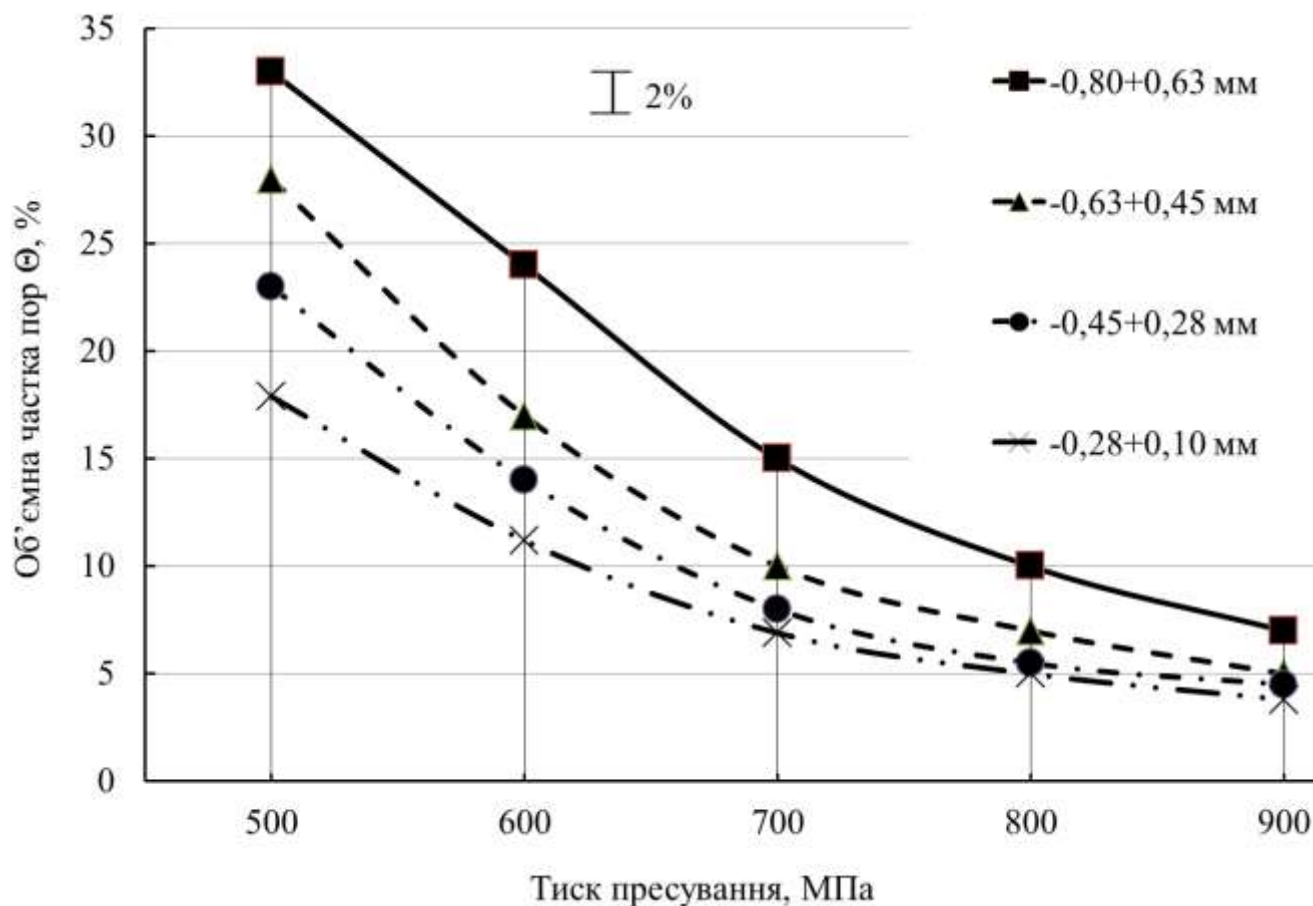
Ще одним поясненням виникнення усадки є механізм спікання, що наведено

у [199, 200]. Згідно з цим механізмом, вільна енергія, що надана частинкам порошку, звільняється при підвищенні температури. Вона спрямована у бік сусідньої частинки порошку, тому призводитиме до деформацій стискання сусідніх частинок, витиснення пор на границі зерен та на периферію зразка, а це в свою чергу до усадки. При цьому процеси, що описані, будуть проходити тим швидше і більше, чим більше енергії буде надано частинкам порошку при пресуванні. Наведений механізм пояснює, чому у зразках із більшим тиском пресування встановлено меншу пористість. Використовуючи мікрометр було оцінено усадку зразків спечених титанових сплавів. Лінійна усадка таких зразків не перевищувала 3 %. Аналіз знімків показує, що пори в спечених пресовках мали різноманітну конфігурацію, їх кількість і середні розміри зменшувались відповідно з 33 % до 3,8 % і з 120 мкм до 21 мкм зі зменшенням фракції порошку і зі збільшенням тиску пресування.

З наведених в таблиці 3.3 результатів кількісної металографії виходить, що між тиском пресування, розміром частинок порошку і пористістю спостерігаються досить чіткі залежності (рис. 3.7 і 3.8). Отримані результати підрахунків показують, що зі збільшенням розміру частинок порошку для спечених зразків об'ємна частка пор при однаковому тиску пресування підвищувалась. Найбільша пористість відповідала фракційному складу з найбільшим розміром частинок порошку ($-0,80+0,63$ мм) і найменшому тиску пресування заготовки (500 МПа). При однаковому тиску пресування (наприклад 700 МПа) зі зменшенням фракції порошку з $-0,80+0,63$ мм до $-0,28+0,1$ мм середній розмір пор зменшувався з 90 мкм до 27,5 мкм; зі зростанням тиску пресування з 500 МПа до 900 МПа для найбільшої фракції $-0,80+0,63$ мм середній розмір пор зменшувався з 120 мкм до 68 мкм. Найбільш висока густина і мінімальний розмір пор характерні для заготовок з дисперсних порошоків ($-0,28+0,10$ мм і $-0,45+0,28$ мм), що отримані при тиску пресування 900 МПа (див. табл. 3.3, рис. 3.8).

Отже, аналізом даних таблиці 3.3 встановлено, що у межах однієї фракції при збільшенні зусилля пресування відбувається зменшення середнього розміру

пор. Так, встановлено, що на кожні 100 МПа відбувається зменшення середнього розміру пор на 12 % для фракції $-0,80+0,63$ мм. При цьому, для фракції $-0,63+0,45$ мм – на 16 %; для фракції $-0,45+0,28$ мм – на 26 %; для фракції $-0,28+0,10$ мм – на 30 %. Це є доказом того, що при зменшенні розміру частинок порошку їх компактування проходить по більш сприятливих процесах, що дозволяє зменшити щільність при виготовленні зразків. Однак, як було зазначено вище, то зменшення розміру фракції призводить до збільшення вмісту шкідливих домішок у сплаві. Тому необхідно проводити раціоналізацію фракційного складу за технологічними потребами.

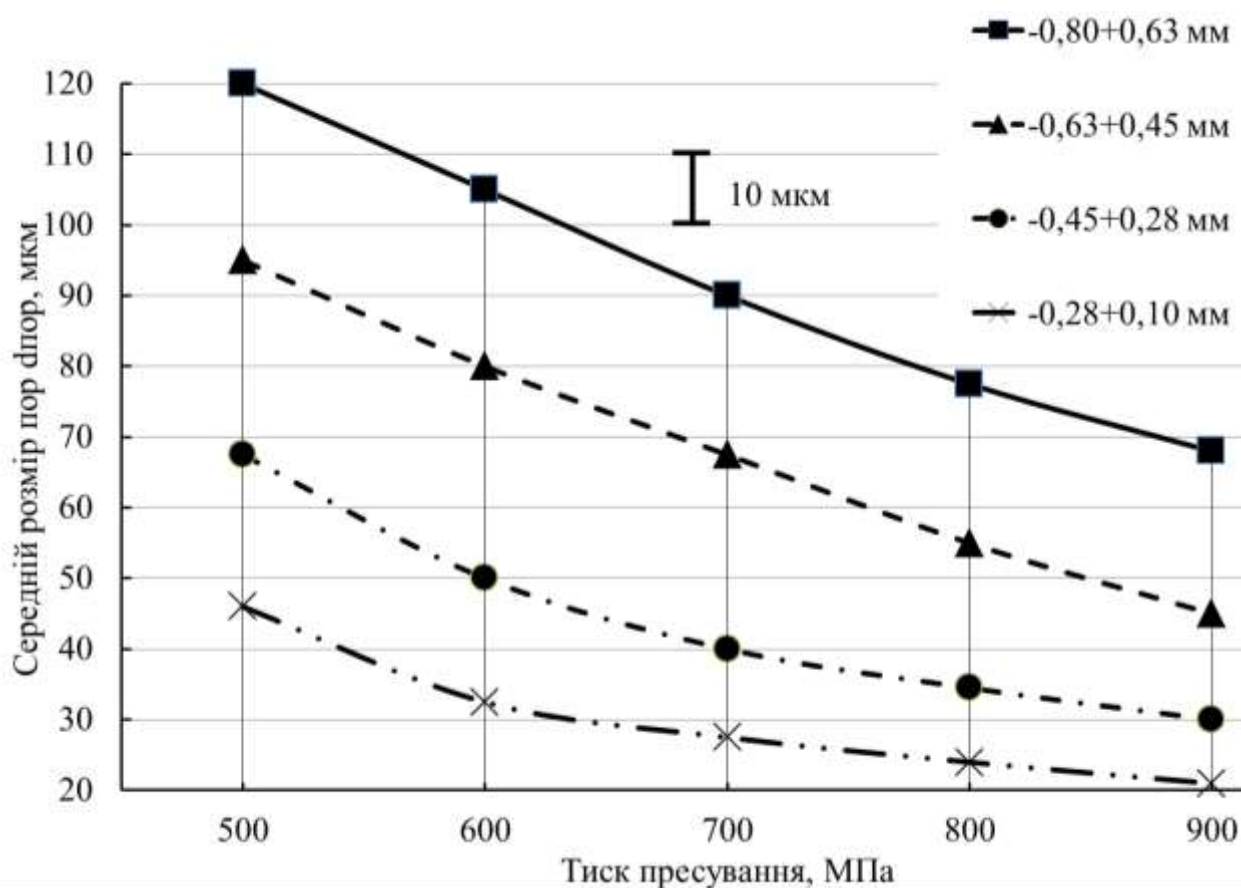


⊥ – похибка вимірювання

Рисунок 3.7 – Залежність пористості зразків від фракції порошку і тиску пресування

Математична обробка отриманих результатів за методикою (розділ 2, п. 2.11) показала, що із збільшенням розміру фракції збільшується

середньоквадратичне відхилення. Його мінімальні значення для фракції - $0,28+0,10$ мм було встановлено 0,51. Для «великої фракції», розміром $-0,80+0,63$ мм, середньоквадратичне відхилення склало понад 32,0. Це, певно, означає, що по металевій структурі зразків з фракції $-0,80+0,63$ мм розкидано велику кількість різноманітних пор, розміри яких знаходилися у широкому діапазоні.



┘ – похибка вимірювання

Рисунок 3.8 – Залежність середнього розміру пор $d_{\text{пор}}$ у зразках від фракції порошку і тиску пресування P

Аналізуючи наведені дані можна зробити висновок, що доцільним буде використання фракцій «середнього» розміру. Графічну інтерпретацію отриманих закономірностей наведено на рисунках 3.7 – 3.8. Збільшення тиску пресування з 500 МПа до 900 МПа призводило до зниження об'ємної пористості заготовок. Зі зменшенням фракції порошку при тиску 500 МПа зниження об'ємної пористості заготовок становило в середньому 5 % незалежно від розміру порошоків, при тиску

600 МПа – в середньому 3 %, при тиску 700...900 МПа для фракцій порошку менше 0,63 мм – не більше 2 % (див. рис. 3.7).

Зниження об'ємної частки пор і їх розмірів зі зменшенням фракції порошку можна пояснити тим, що дрібніший порошок при пресуванні укладається більш компактно, тому утворюються дрібніші пори, які легше «заліковуються» в процесі спікання. Зменшення об'ємної частки пор і їх розмірів зі збільшенням тиску пресування можна пояснити впливом пластичної деформації при пресуванні і дифузії титану при спіканні.

Рисунок 3.8 ілюструє комплексний вплив розміру порошоків і тиску пресування на середній розмір пор $d_{\text{пор}}$. Як видно з наведених даних, розмір пор визначається, в першу чергу, розмірною фракцією порошоків і, в меншій мірі, тиском пресування. При цьому спостерігається практично прямолінійна залежність $d_{\text{пор}} = f(P)$, що дорівнює в середньому приблизно 0,14 мм/МПа для фракцій порошку -0,80+0,63 мм і -0,63+0,45 мм.

Ущільнення дрібних фракцій порошоків -0,45+0,28 мм і -0,28+0,10 мм було інтенсивним в інтервалі тисків 500...700 МПа і незначним в інтервалі 700...900 МПа. В цілому, отриманий на рисунку 3.8, графік залежності середнього розміру пор від тиску пресування не суперечить загальноприйнятим закономірностям. Однак, отриманий графік дозволяє розширити уявлення про вплив тиску пресування у діапазоні від 500 МПа до 900 МПа для фракцій порошку ПТ, що досліджувалися. Практичне значення цього результату полягає у можливості прогнозування очікуваної пористості спеченого сплаву. Встановлені закономірності зменшення кількості пор та зменшення їх середнього розміру повинні відбиватися на рівні механічних та експлуатаційних властивостей. Слід очікувати, що залежність механічних властивостей від фракційного складу порошоків, тиску пресування і пористості буде носити складний характер.

3.3 Механічні властивості спечених зразків

Досліджували закономірності впливу тиску пресування на границю міцності, відносне подовження та твердість (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Механічні властивості спечених зразків з технічного титану

№, п/п	Технологічні фактори		Механічні властивості		
	Фракція порошку, мм	Тиск пресування Р, МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ
1.	-0,80+0,63	500	275,7	4,8	79,6
2.		600	309,7	6,8	85,5
3.		700	328,3	7,9	89,6
4.		800	336,0	8,6	91,7
5.		900	340,1	9,0	93,9
6.	-0,63+0,45	500	290,6	4,0	106,3
7.		600	328,3	5,8	121,6
8.		700	355,1	7,2	126,7
9.		800	364,9	7,9	129,2
10.		900	370,0	8,2	131,4
11.	-0,45+0,28	500	308,4	3,4	127,8
12.		600	347,6	5,2	144,2
13.		700	377,5	6,7	153,7
14.		800	385,8	7,5	160,3
15.		900	389,8	7,9	163,9
16.	-0,28+0,10	500	332,9	3	151,0
17.		600	374,4	4,7	179,1
18.		700	394,7	6,3	190,8
19.		800	401,4	6,9	196,0
20.		900	405,1	7,2	199,1

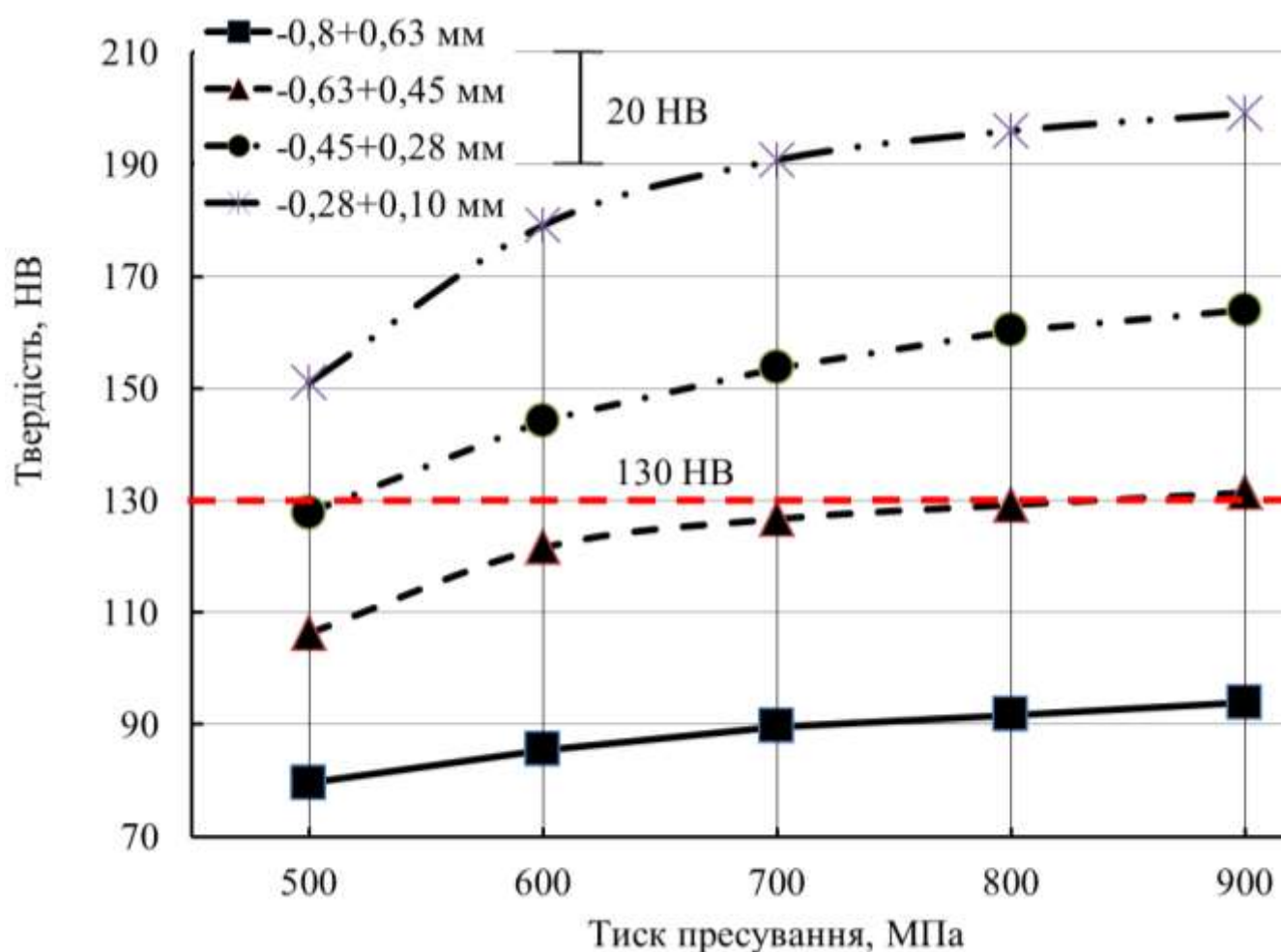
Механічні властивості випробовували за стандартними методиками ГОСТ 1497-84. Використовували зразки тип III, номер 7. Такі розміри зразків дозволяли вилучити частину металу, що мала недопресованість (див. рис. 3.2) і не приймати її у визначені властивостей.

З представлених в таблиці 3.4 результатів механічних випробувань виходить, що між тиском пресування і об'ємною часткою пор, з одного боку, і механічними властивостями, з іншого боку, спостерігаються досить чіткі залежності. Математичну обробку даних таблиці 3.4 проводили за методикою (розділ 2, п. 2.11), яка дозволила встановити, що із зменшенням фракції досліджуваного порошку титану марки ПТ середньоквадратичне відхилення зменшується. Так для фракції $-0,28+0,10$ мм воно складало до 30 МПа. Із збільшенням фракції порошку, середньоквадратичне відхилення збільшувалося на 5...8 %. Така закономірність підтверджувалася металографічними дослідженнями сплавів, що отримані з цих фракцій порошку. Сказане підтверджується представленими на рисунках 3.9–3.14 графіками, аналіз яких дозволяє зробити наступні узагальнення.

Як і слід було очікувати, збільшення тиску пресування з 500 МПа до 900 МПа призводило до зростання твердості з 13 МПа для фракції $-0,80+0,63$ мм до 50 МПа – для фракції $-0,28+0,10$ мм (див. рис. 3.9). Це можна пояснити тим, що при спіканні зразків з крупної фракції порошку титану, відбувалось формування збільшених пор, розмір яких дозволяв зменшувати площу контакту індентора із металічною матрицею титану. Також збільшення твердості могло досягатися тим, що менші фракції порошку титанового сплаву були більше ніж великі фракції того ж порошку насичені домішками (кисень, водень, залізо). Як видно з рисунка 3.9, застосування порошків фракцій $-0,80+0,63$ мм і $-0,63+0,45$ мм не забезпечує отримання потрібного рівня твердості, в той же час для отримання твердості $HB > 130$ необхідно використовувати порошок фракцій $-0,45+0,28$ мм і $-0,28+0,10$ мм і тиск пресування більше 500 МПа.

Аналогічні закономірності встановлено для границі міцності і відносного подовження зразків. Встановлено збільшення границі міцності і відносного

подовження відповідно на 65...80 МПа і 4...5 % незалежно від фракції порошків. Аналогічний ефект справляло також зменшення фракції порошку, при переході від фракції $-0,80+0,63$ мм до $-0,28+0,10$ мм підвищення твердості і границі міцності становило відповідно близько 90 МПа і 60 МПа (див. рис. 3.9 і 3.10). Останнє можна пояснити збільшенням питомої поверхні порошків і, відповідно, довжини границь зерен у металі зразку. З цієї ж причини мало місце зниження пластичності при заданому тиску пресування (див. рис. 3.11).



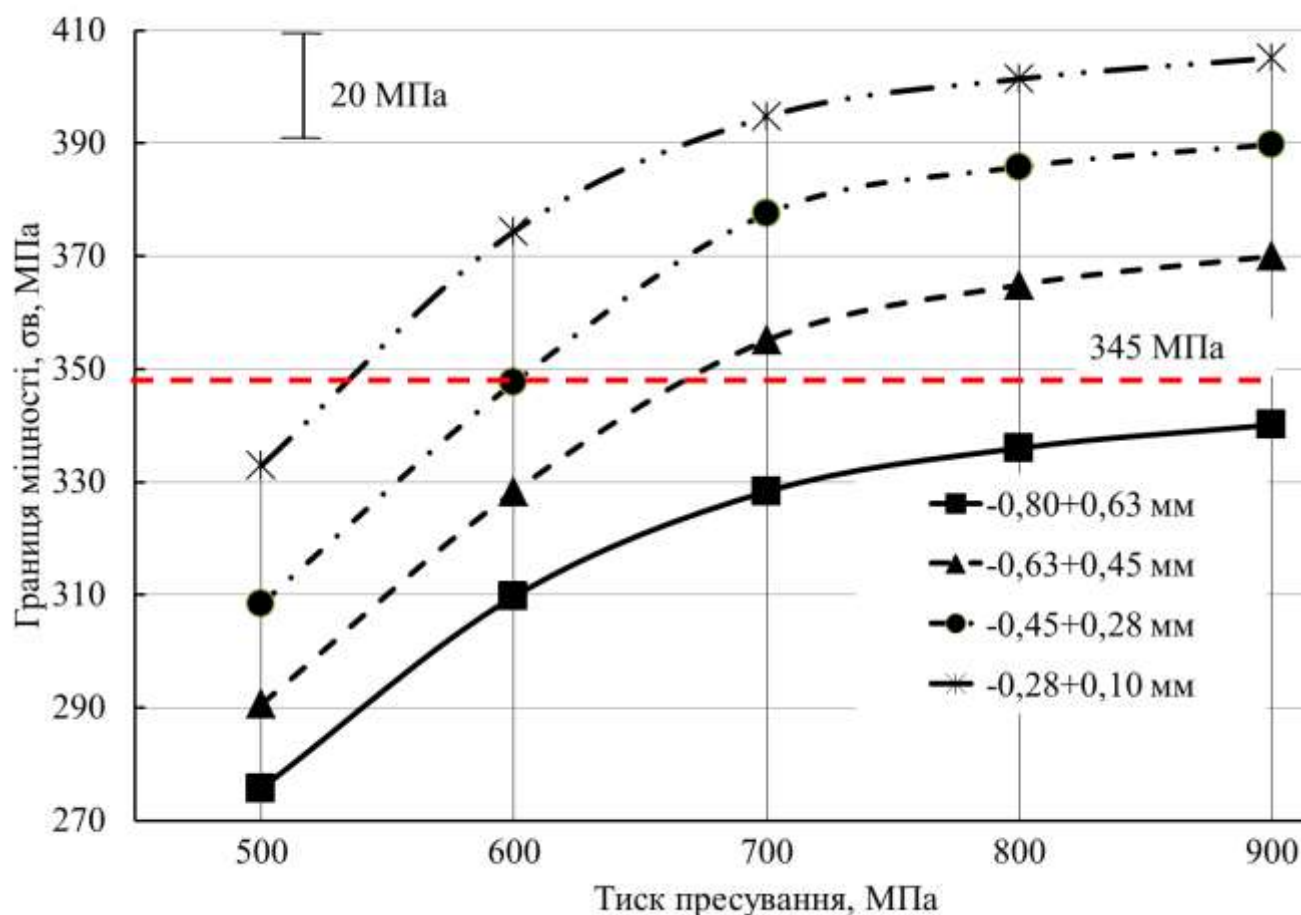
┘ – похибка вимірювання; - - - - - нижня границя механічних властивостей технічного титану, що отриманий за традиційними технологіями

Рисунок 3.9 – Залежність твердості зразків від фракції порошку і тиску пресування

З представлених на рисунку 3.10 даних виходить, що границя міцності

$\sigma_b \geq 345$ МПа може бути отримана для фракцій:

- -0,63+0,45 мм при тиску пресування понад 700 МПа;
- -0,45+0,28 мм при тиску пресування понад 600 МПа;
- -0,28+0,10 мм при тиску пресування понад 650 МПа.

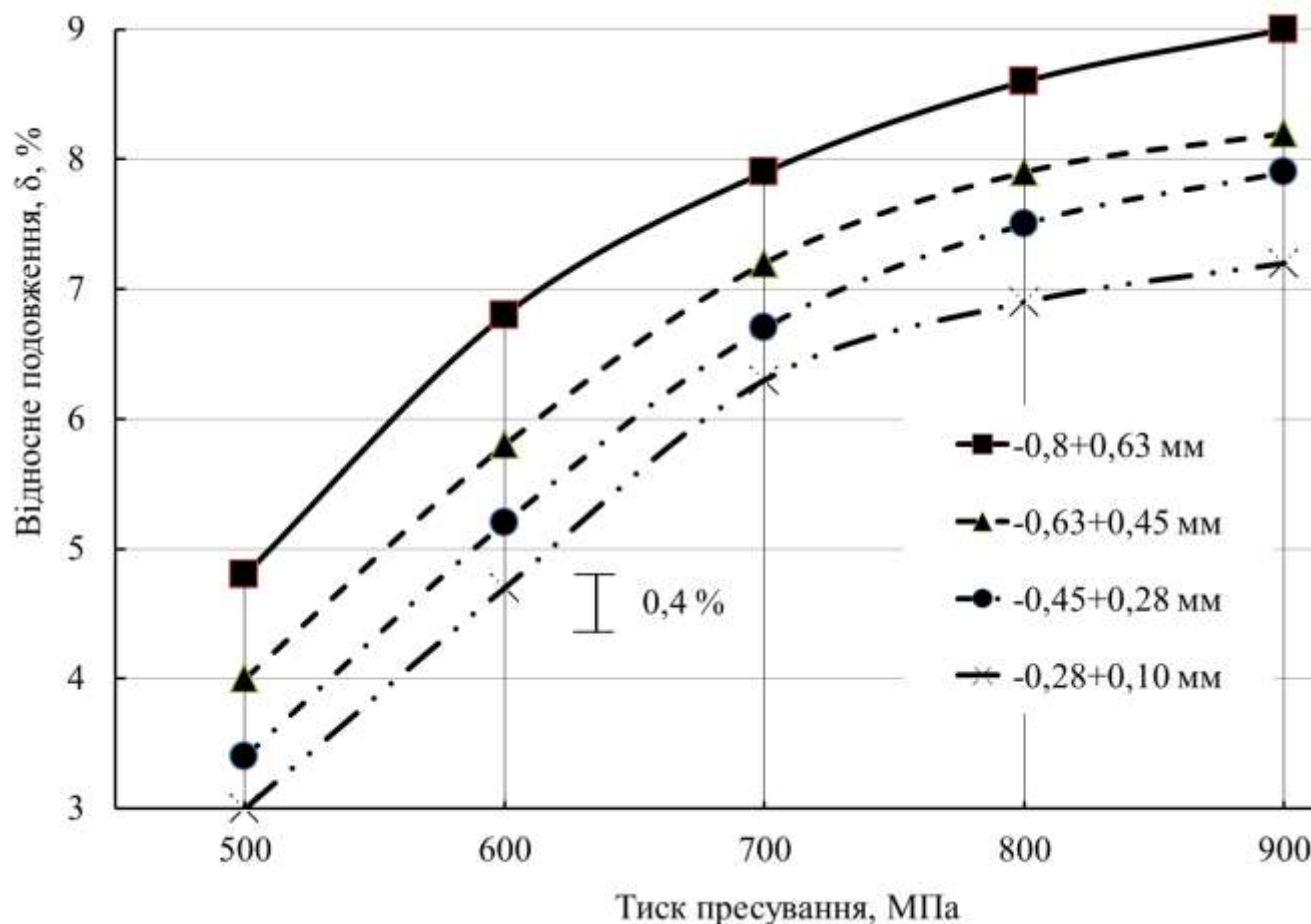


┘ — похибка вимірювання; - - - - - — нижня границя механічних властивостей технічного титану, що отриманий за традиційними технологіями

Рисунок 3.10 – Залежність границі міцності σ_b від фракції порошку і тиску пресування

Як показано на рисунку 3.11, із збільшенням тиску пресування збільшувалося відносне подовження. Це можна пояснити тим, що збільшення тиску пресування приводе до зменшення пористості в цілому, а це супроводжується збільшенням металевої матриці пластичного титанового сплаву ВТ1-0, який отримується при спіканні порошку титану марок ПТ. Такий ефект

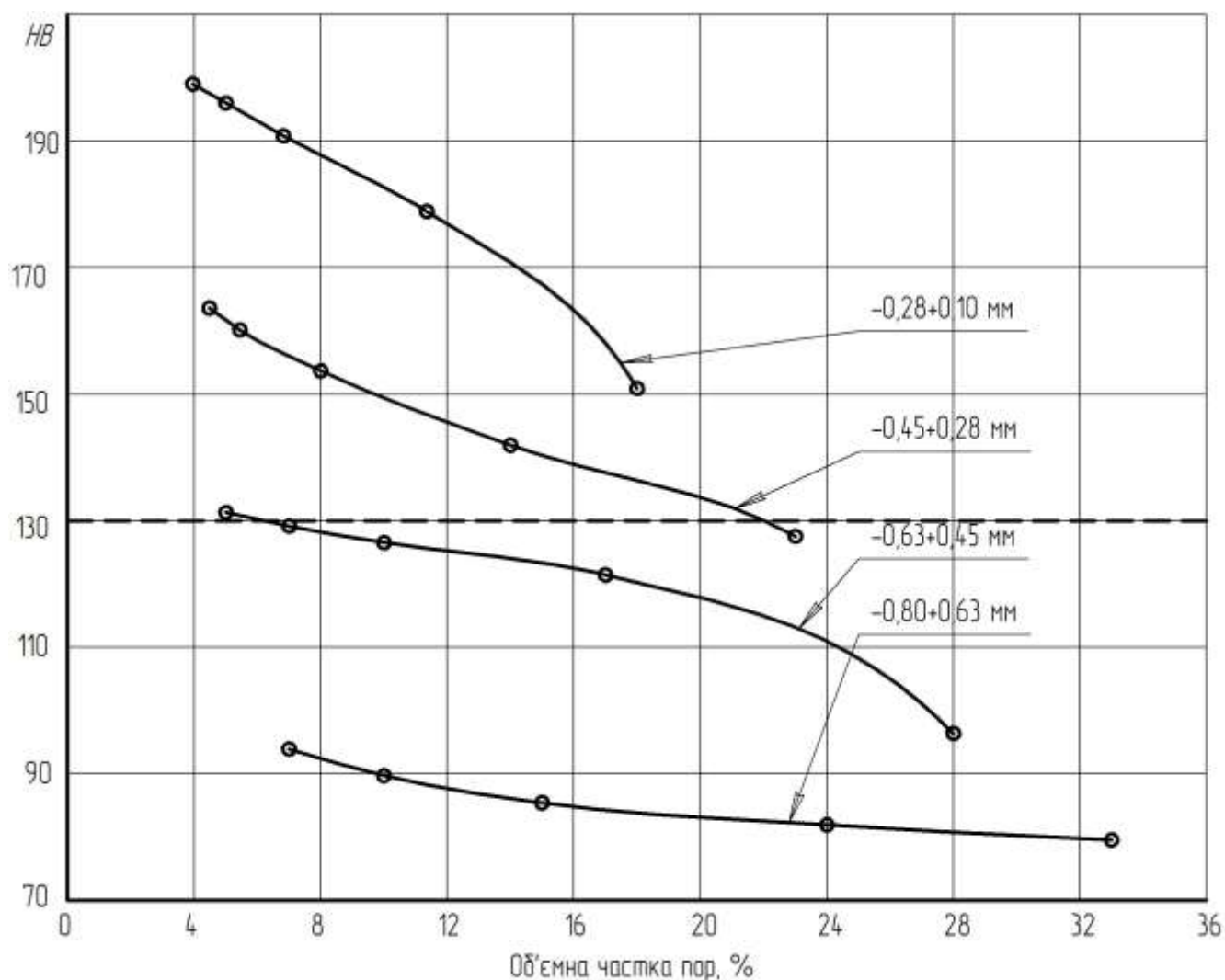
поліпшується при зменшенні фракції порошку титану.



┘ – похибка вимірювання

Рисунок 3.11 – Залежність відносного подовження δ від фракції порошку і тиску пресування

Інтенсивне зростання механічних властивостей при збільшенні тиску з 500 МПа до 700 МПа можна пояснити пропорційним зв'язком між тиском пресування і міцністю зчеплення порошинок. При подальшому збільшенні тиску з 700 МПа до 900 МПа зростання властивостей менш інтенсивне. Таким чином, в діапазоні 500...700 МПа настає вихід на насичення механічних властивостей заготовок, що говорить про досягнення границі текучості порошку. Вплив пористості спечених пресовок на величину показників твердості, міцності і пластичності наведено на рисунках 3.12–3.14.

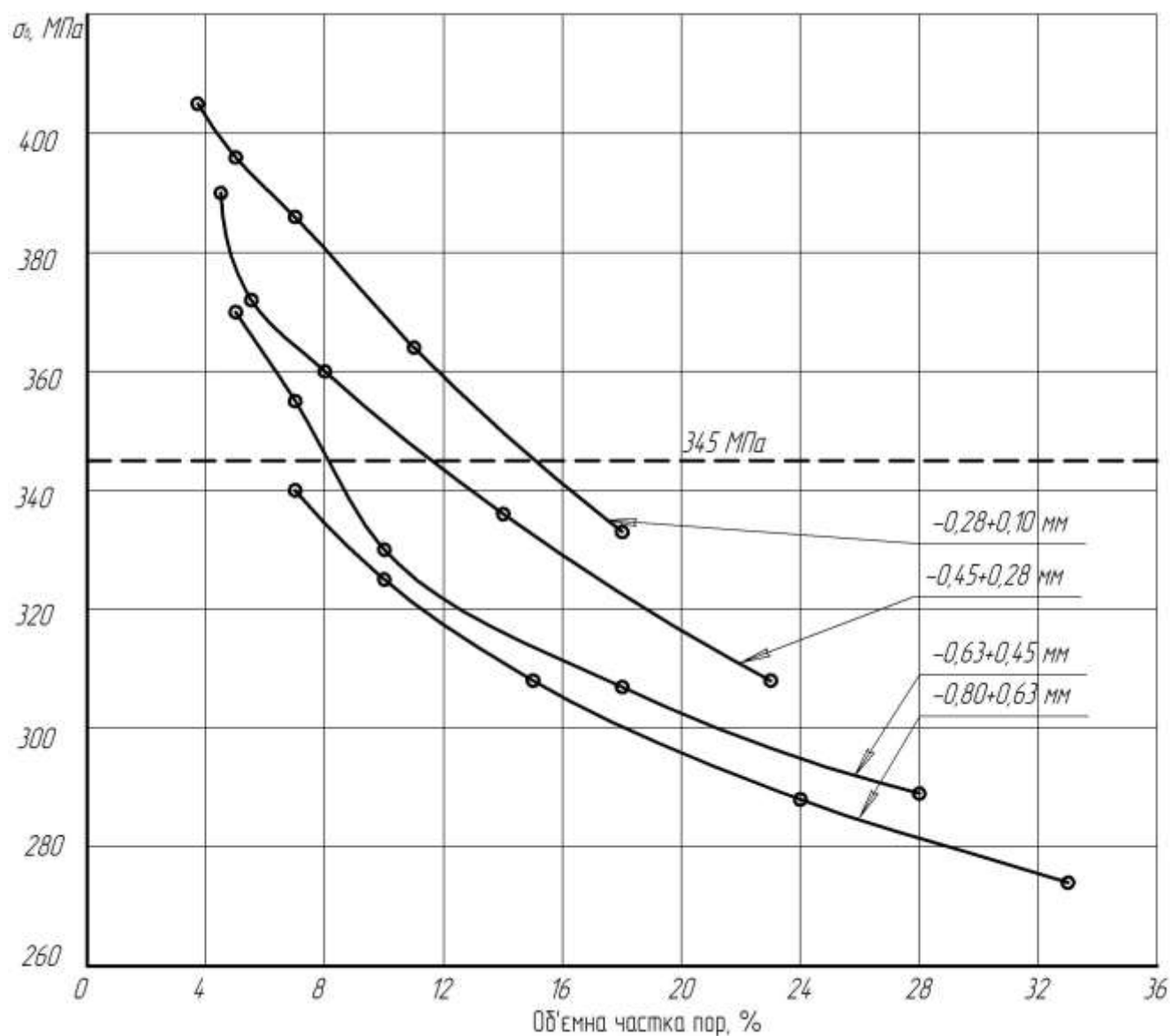


- - - - - нижня границя механічних властивостей технічного титану, що отриманий за традиційними технологіями

Рисунок 3.12 – Залежність твердості HB від пористості зразків

Так, аналіз даних рисунка 3.12 показав, що із збільшенням фракції порошку титану змінюється залежність впливу об'ємної пористості на твердість. Фракція порошку $-0,80+0,63$ мм показала незначний вплив об'ємної пористості на показник HB. Пологість кривої можна пояснити тим, що великі частинки порошку менш насичені домішками, які підвищують твердість у порівнянні з фракцією $-0,28+0,10$ мм. Аналогічні закономірності зв'язку насиченості фракцій, об'ємної пористості та твердості спостерігаються на інших фракціях. Однак кривизна і пологість лінії змінюються. Так для фракції $-0,63+0,45$ мм необхідна твердість досягається тільки при об'ємному вмісті пор до 8 %, але для фракції $-0,45+0,28$ мм

це досягається майже в усіх досліджуваних значеннях показника об'ємної пористості.



----- — нижня границя механічних властивостей технічного титану, що отриманий за традиційними технологіями

Рисунок 3.13 – Залежність границі міцності σ_b від пористості зразків

З даних рисунка 3.13 бачимо, вплив об'ємної пористості на границю міцності у спеченому титановому сплаві BT1-0 виражено значніше ніж вплив на твердість. При цьому всі фракції, окрім -0,80+0,63 мм, забезпечують міцність на рівні або вище рівня міцності литого BT1-0. Така поведінка міцності пояснюється підвищеним вмістом кисню. Характер спаду кривих майже однаковий, що

дозволяє зробити висновок про однаковий вплив об'ємної пористості на границі міцності, а саме: збільшення пористості у структурі спеченого сплаву, отриманого з порошку титану ПТ, незалежно від фракції, призведе до значного зменшення границі міцності. При цьому, значення концентрацій кисню, який суттєво впливає на рівень границі міцності не змінювалося в залежності від розміру фракції. Тому, зміна міцності досягається лише через зміну пористості досліджуваного сплаву, а не через зміну твердості металічної матриці сплаву. Підтверджує це і аналіз даних рисунків 3.7 – 3.12, а саме, зменшення розміру частинок порошку або збільшення тиску пресування призводить до збільшення компактоспроможності частинок порошку. Формовка зразка на стадії пресування вже є із заздалегідь зменшеною пористістю. Спінання призводить до ще більшого загоєння пор і, як наслідок, компактності структури. Авжеж, менші пори легше загоюються при спіканні. Розтягання зразка супроводжується опором площі поперечного перерізу зусиллю деформації. Тобто, збільшення об'ємного вмісту пор (пора – пустота) призводитиме до зменшення площі поперечного перерізу – зниженню значення границі міцності при тих же самих характеристиках металічної матриці.

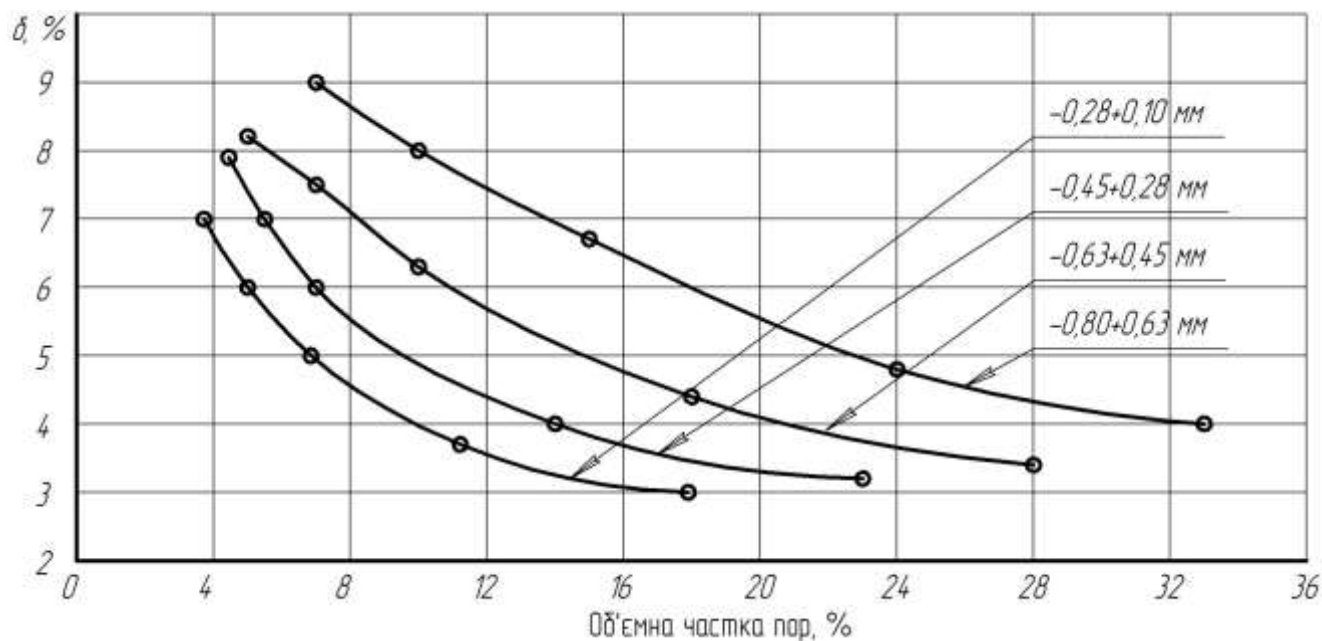


Рисунок 3.14 – Залежність відносного подовження δ від пористості зразків

Із залежностей, наведених на рисунку 3.14 можна зробити висновок, що

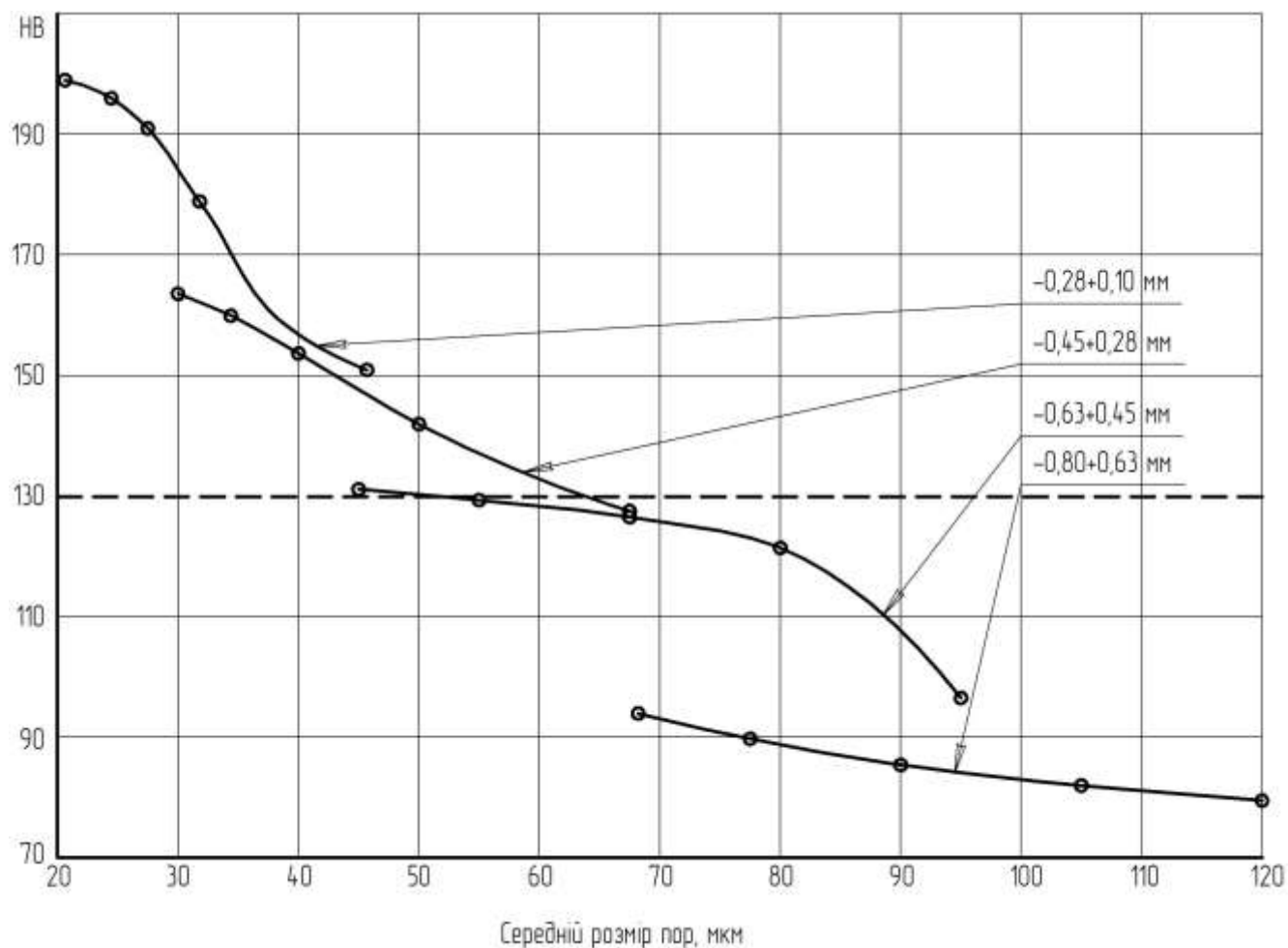
об'ємна частка пор для всіх фракційних складів впливає на абсолютне видовження. Чим більша доля пор – тим менше видовження. Це пояснюється аналогічними процесами, що і для границі міцності – зменшена на величину об'ємної пористості площа поперечного перерізу менше деформується на величину, що корелює з вмістом пор за об'ємом. По графіках видно, що стрімке падіння видовження проходить при зміні об'ємного вмісту пор з 4 % до 12 %. Подальше збільшення пористості не призводить до значного зменшення абсолютного видовження.

Об'ємна частка пор спечених пресовок, що змінюється від 33 % до 3,8 % із зростанням тиску пресування від 500 МПа до 900 МПа (див. рис. 3.7), була основним фактором впливу на величину показників твердості, міцності і пластичності (див. рис. 3.12–3.14). Вплив середнього розміру пор на механічні властивості показано на рисунках 3.15–3.17.

З аналізу рисунку 3.15 можна зробити висновок про стрімке зміння твердості при збільшенні середнього розміру пор для малих фракцій порошку титану. Поведінка графіка для крупної фракції може означати, що мала забрудненість частинок порошку домішками (кисень, водень, азот, залізо) приведе до формування не твердої металічної матриці. Наступна за розміром фракція - $0,63+0,45$ мм, також має рівень твердості нижче за аналогічний сплав, отриманий за технологією лиття. Фракції малого розміру мають твердість відповідну до сплаву BT1-0, отриманого за традиційними технологіями через те, що більш насичені домішками ніж крупні фракції. Така ситуація є стандартною для титанових порошків, відображена у ТУ У 14-10-026-98 і підтверджується дослідженнями хімічного складу вихідних порошків.

Зміна середнього розміру пор приводить до значного зміння характеристик границь міцності (див. рис. 3.16) та абсолютного видовження (див. рис. 3.17). Аналогічно впливу об'ємної пористості на границю міцності, розмір пор зменшує активну площу поперечного перерізу, що протистоїть деформуванню. Тому при одних і тих же значеннях зусилля досягається менша міцність на величину, що корелює з середнім розміром пор. При формуванні

зерен при спіканні порошку титанового сплаву на рівні 100 мкм, пори таким же розміром послаблюють переріз майже вдвічі. Це спостерігається на графіках рисунка 3.16. Так замість міцності у 350 МПа, досягається міцність 270 МПа для сплаву, отриманого з фракції $-0,80+0,63$ мм.

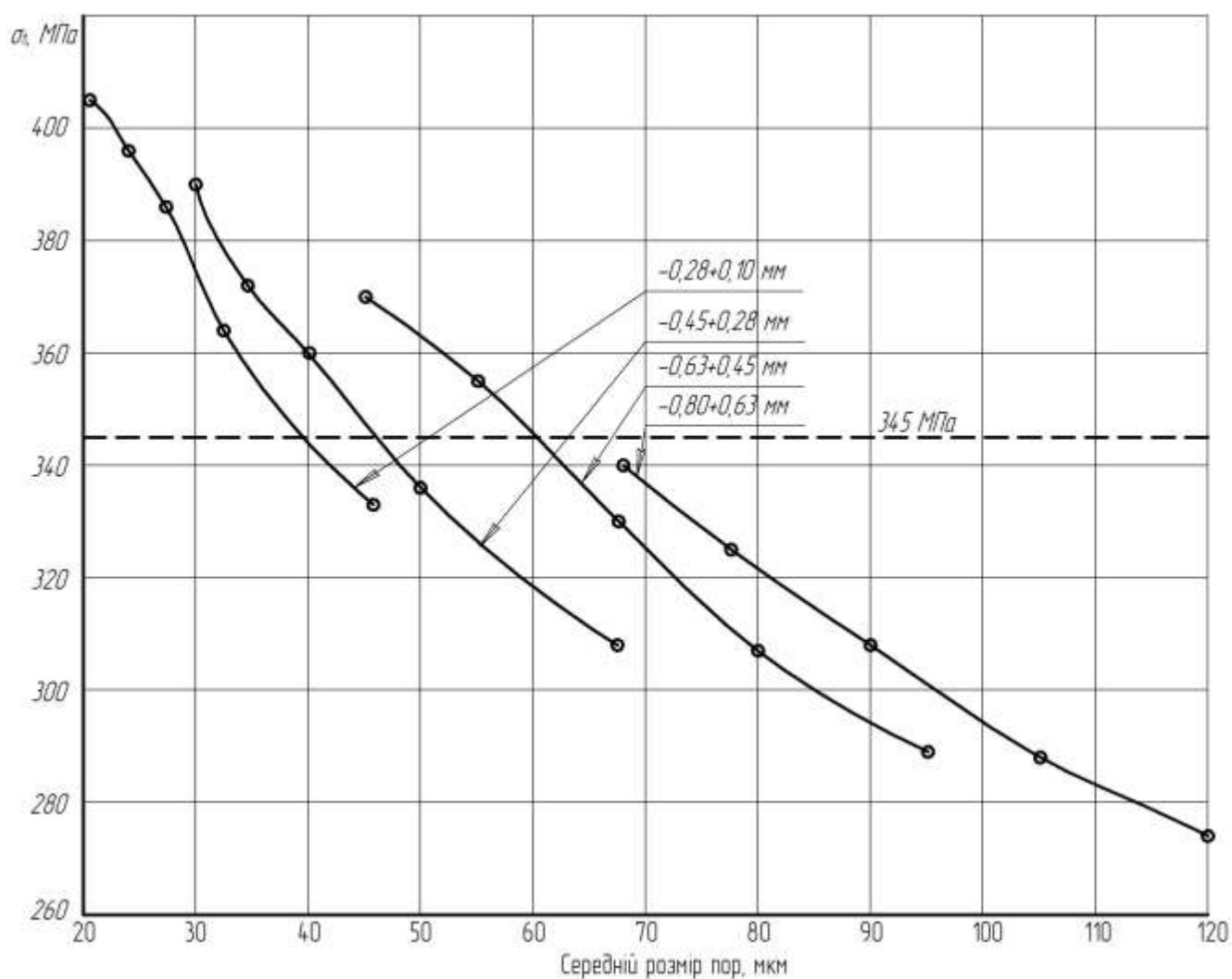


- - - - - – нижня границя механічних властивостей технічного титану, що отриманий за традиційними технологіями

Рисунок 3.15 – Залежність твердості НВ від розміру пор зразків

Найбільш високий ефект збільшення міцності при зменшенні середнього розміру пор відбувається на малих фракціях. Так для фракції $-0,28+0,10$ мм границя міцності зменшується з 410 МПа до 330 МПа. Наряду з тим, середній розмір пор перевищує початковий розмір частинок порошку на 0,26 мм. З аналізу даних рисунка 3.16 можна зробити висновок, що для досягнення найбільшої можливої міцності спеченого сплаву слід використовувати порівняно малі

фракції.



- - - - - — нижня границя механічних властивостей технічного титану, що отриманий за традиційними технологіями

Рисунок 3.16 – Залежність границі міцності σ_B від розміру пор зразків

Зміна абсолютного видовження проходить по аналогічним до границь міцності закономірностям. Це не суперечить загальноприйнятим закономірностям, що великі границі зерен зменшують пластичність матеріалу і навпаки. Ефект від збільшення розміру пор не такий значимий, як для границь міцності. Але у межах однієї фракції цей ефект може складати до 50 % (див. рис. 3.17), незалежно від розміру фракції.

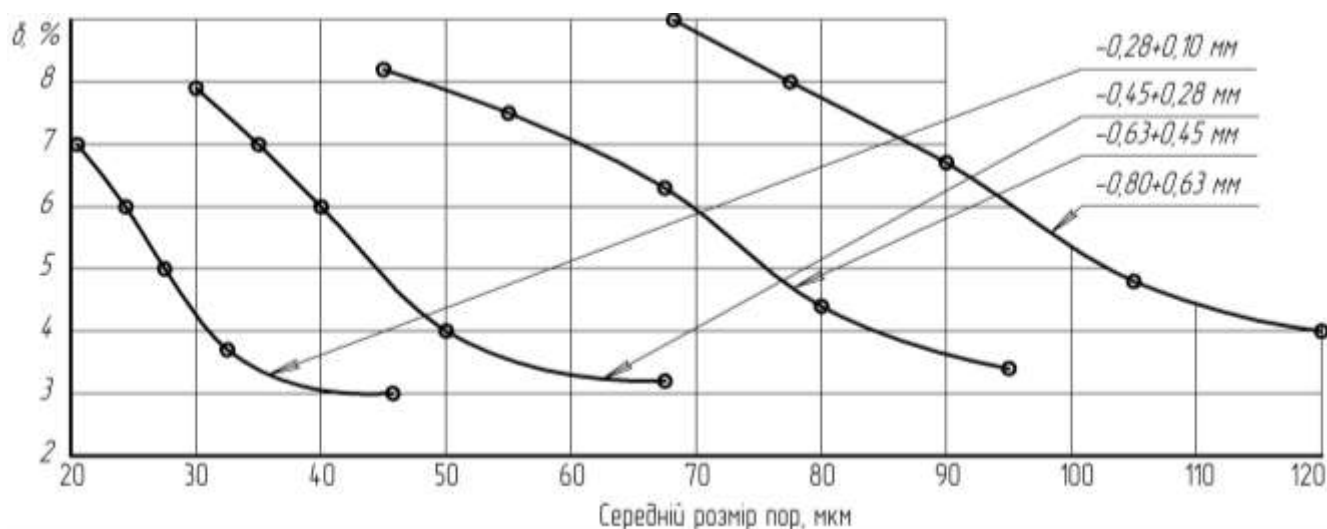


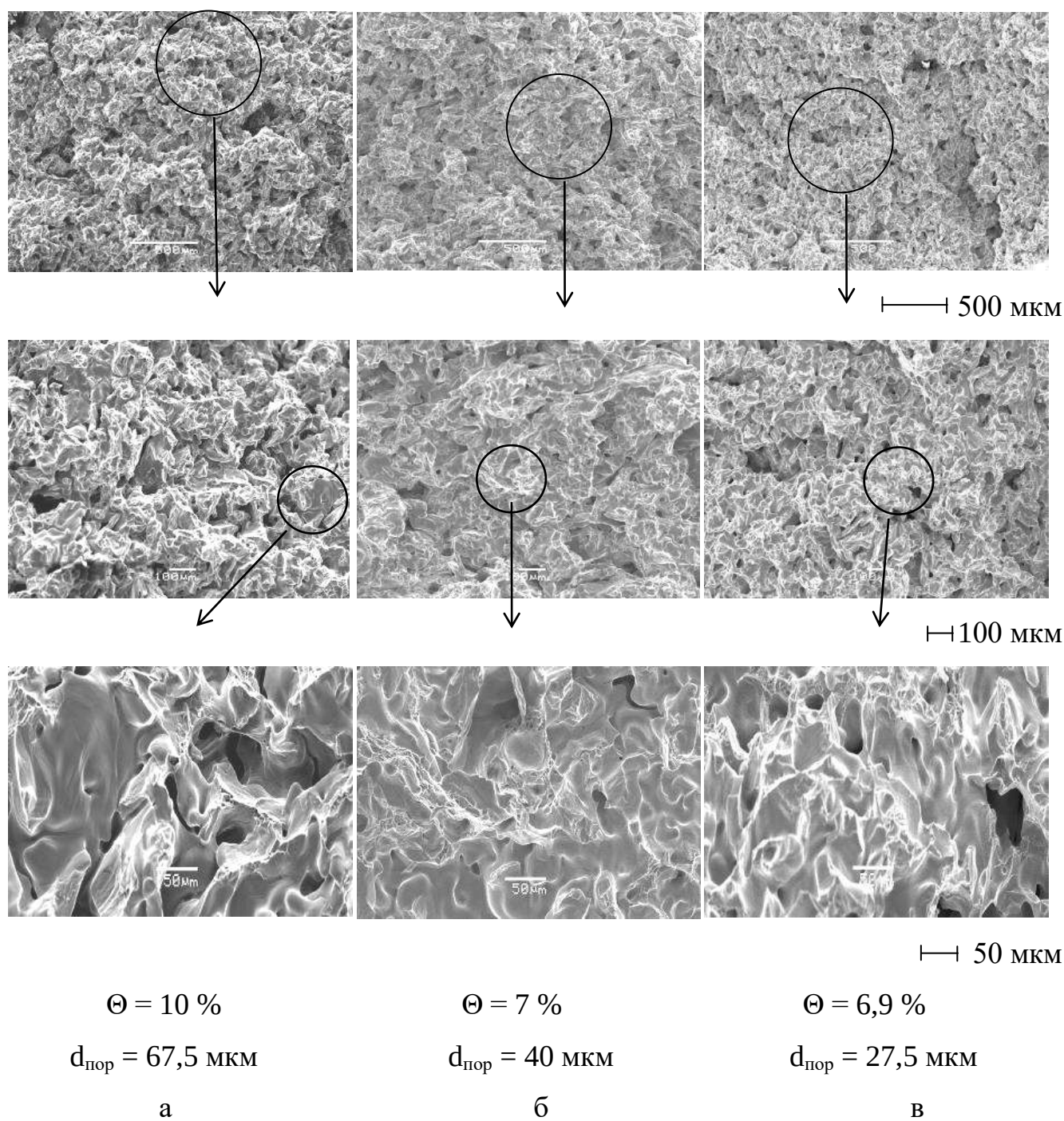
Рисунок 3.17 – Залежність відносного подовження δ від розміру пор зразків

В цілому, зменшення розміру частинок порошоків в досліджуваних межах призводило до підвищення твердості до двох разів, границі міцності і відносного подовження на 15...20 % при тисках пресування – 700...900 МПа.

Таким чином, представлені на рисунках 3.12-3.17 графічні залежності механічних властивостей від об'ємної пористості і розміру пор показують, що для забезпечення мінімальних допустимих рівнів твердості $HV > 130$ і границі міцності $\sigma_b \geq 345$ МПа необхідно використовувати порошок титану фракцій: -0,45+0,28 мм і -0,28+0,10 мм.

При отриманні титанових сплавів методом ПМ пори є невід'ємною частиною структури. Усунути пористість в структурі матеріалу, отриманого методом ПМ, дуже складно. Слід мати на увазі, що їх кількість і розміри змінюють характер руйнування сплаву при статичних навантаженнях, що підтверджують результати аналізу поверхні руйнування зразків після механічних випробувань (рис. 3.18).

Аналіз характеру руйнування при статичних навантаженнях (див. рис. 3.18) показав, що вплив пор на руйнування неоднозначний. Так, в зразках, в яких середній розмір пор становив 27,5 мкм, тріщини ініціювалися з пор в 10...15 % випадків, в зразках з порами 40 мкм – в 37...42 % випадків, в зразках з порами понад 67,5 мкм – в 76...85 % випадків.



а – $-0,63 \pm 0,45 \text{ мм}$; б – $-0,45 \pm 0,28 \text{ мм}$; в – $-0,28 \pm 0,1 \text{ мм}$

Рисунок 3.18 – Вплив фракції порошку на характер руйнування спечених заготовок, отриманих при тиску пресування 700 МПа

Основні фактори негативного впливу пор на механічні властивості є: зниження площі поперечного перерізу і дія пор як концентраторів напруження (центрів зародження мікротріщин). Останній механізм у багато чому залежить від розміру, геометрії пор, їх кількості і рівномірності розподілу. Механізм

руйнування є вивчений, а ступінь впливу для конкретних умов і матеріалів визначається експериментально, що і зроблено в даній роботі. В цілому, зі зростанням розмірів і кількості пор механічні властивості порошкового титану знижувалися.

З аналізу фрактограм поверхонь руйнування зразків при одновісному розтяганні, можна зробити висновок, що пори не завжди є ініціаторами зародження тріщин. Їх негативний вплив полягає, перш за все, в ослабленні площі поперечного перерізу зразка. На зразках із підвищеною пористістю, тобто отриманих на малих зусиллях пресування із відносно великих фракцій порошку борозенки сусідніх зерен не співпадають за траєкторією. Це є наслідком наявності декількох фронтів руйнування, а отже говорить про значущу роль пор при руйнуванні. Для зразків, де кількість пор не перевищує 10 % можна стверджувати, що їх роль в зменшенні опору руйнуванню незначна. Таким чином, роль пор у процесах руйнування спечених зразків із сплаву VT1-0, отриманого з різних фракцій вихідного порошку, слід диференціювати в залежності від об'ємного вмісту, розміру пор.

Порівняльний аналіз таблиці 3.5 показує, що дослідні спечені пресовки мали рівень твердості та границю міцності, близькі до рівня властивостей литого і деформованого титану того ж складу. Однак, показники пластичності (відносне подовження та звуження) спеченої заготовки нижче, ніж у заготовок, отриманих за традиційними технологіями, тому, що пори є концентраторами напружень і можуть бути ініціаторами зародження тріщин. У той же час спечені зразки перевершували литі за величиною ударної в'язкості. Останнє пояснюється наступним. Відомо, що робота руйнування ударного зразка складається з роботи зародження тріщини A_z і роботи поширення тріщини A_n . За величиною A_n спечені сплави істотно перевершують литі, завдяки тому, що пори гальмують поширення тріщин від статичного навантаження.

Відомо, що розмір зерен як монолітних, так і порошкових металів, є основним фактором, що визначає їх властивості. В цьому плані спечені титанові сплави мають переваги перед сплавами, отриманими методами лиття. У ливарних

сплавах мають місце великі литі зерна з розмірами до 400 мкм, в той час як в спечених сплавах максимальний розмір зерен не перевищує 100 мкм. Це є наслідком формування зереності сплавів на стадіях подрібнення порошку титану, марок ПТ. Відомо, що титанова губка, з якої виготовляють зазначені порошки титану є сформованим кристалітом дендритної будови. Насиченість деяких об'ємів титанової губки домішками, що впроваджуються з матеріалу реторти, дозволяє без додаткових операцій подрібнювати блоки титану губчатого. Тобто, отримується, по-факту, дуже подрібнений титан губчатий, який не змінює своєї будови, а лише розділяється механічно. Термічного впливу на матеріал немає і структура не змінюється, зерна не підвищують довжину ліній контакту шляхом дифузії. Тобто, отримуються відносно малі частини титану губчатого.

Таблиця 3.5 – Механічні властивості заготовок з технічного титану, отриманих за різними технологіями

Спосіб виготовлення	Стан зразку	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ
Обробка тиском	гарячекатаний відпалений (ГОСТ 26492-85)	≥ 345	–	$\geq 15,0$	$\geq 40,0$	$\geq 70,0$	–
Лиття	литий [201]	≥ 343	≥ 294	$\geq 10,0$	$\geq 20,0$	≥ 49	≥ 131
Порошкова металургія	спечений	345... 400	305,5... 344,2	7...8	14,2... 19,1	87,8... 108,3	131...199

Іншою перевагою спечених сплавів перед литими є значно менша різнозереність структури і, як наслідок, менша анізотропія механічних властивостей. Доказом цього є зображення структури спечених заготовок, отриманих з порошків різного фракційного складу. Аналогічні закономірності встановлено при дослідженні середньоквадратичних відхилень, отриманих за методикою (розділ 2, п. 2.11).

Таким чином, дослідні спечені сплави можуть застосовуватися в якості

конструкційного матеріалу для виготовлення методами зварювання деталей, що працюють в умовах незначних навантажень. Для подальшого підвищення механічних властивостей порошкових виробів з титану було виконано роботу з оптимізації технології їх виготовлення методом планування експерименту.

3.4 Матриця планування експерименту

Як було показано вище (див. рис. 3.9-3.17 і табл. 3.3), механічні властивості спечених пресовок залежать від пористості, яка змінюється в основному від двох факторів: тиску пресування і фракції порошоків. В даній роботі ставилося завдання отримання спечених заготовок з наступними показниками механічних властивостей: межа міцності $\sigma_b \geq 345$ МПа і твердість $HB > 130$ при можливо більших значеннях пластичності. Ці показники близькі до мінімальних вимог до механічних властивостей гарячекатаного титану згідно ГОСТ 26492-85 та литого титану (див. табл. 3.5). Наведені вище результати досліджень свідчать про можливість подальшого підвищення механічних властивостей порошкового титану в основному за рахунок оптимізації фракційного складу порошоків і тиску пресування.

З метою аналізу комплексного впливу зазначених факторів здійснили планування експерименту другого порядку 2^2 , що включає в себе чотири основних досліди і досліди на нульовому рівні (табл. 3.6). В якості незалежних змінних було прийнято: розмір порошку D і тиск пресування P .

Планування експерименту проводили на двох рівнях варіювання. Межі рівнів варіювання і крок варіювання обрані на підставі аналізу хімічного складу, структури і механічних властивостей технічного титану, висвітлених у розділах 1, 3. Нижню межу тиску пресування встановили рівною 500 МПа. Виходячи з результатів попередніх експериментів (див. підрозділ 3.1) при більш низьких значеннях спостерігається непропресованість і осипання нижньої кромки.

Верхню межу тиску пресування залишили рівною 900 МПа.

Таблиця 3.6 – Рівні факторів та інтервали їх варіювання

Показник	Фактори	
	Розмір порошку D, мм	Тиск пресування P, МПа
Основний рівень, X_{i0}	0,45	700
Інтервал варіювання, δ_{0i}	0,26	200
Верхній рівень, $X_{\max} = +1$	0,71	900
Нижній рівень, $X_{\min} = -1$	0,19	500
Кодове позначення факторів	X_1	X_2

Матриця планування експерименту (табл. 3.7) передбачала проведення N дослідів на головних рівнях та досліді на нульовому рівні варіювання факторів:

$$N = 2^k, \quad (3.1)$$

де 2 – кількість рівнів варіювання факторів;

k – кількість факторів ($k = 2$), отже $N = 4$, не враховуючи досліді на нульовому рівні.

Таблиця 3.7 – Матриця центрального композиційного плану для повного факторного експерименту 2^2

№ дослідів	Кодовий масштаб		Натуральний масштаб	
	X_1	X_2	X_1, D	X_2, P
1	+	+	0,71	900
2	–	+	0,19	900
3	+	–	0,71	500
4	–	–	0,19	500
5	0	0	0,45	700

3.5 Реалізація матриці планування

Відповідно до плану експерименту було виготовлено 5 варіантів заготовок з порошків титану заданих фракцій в результаті пресування під тиском 500 МПа, 700 МПа і 900 МПа та спікання при температурі $1250\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом 3 год у вакуумній печі із залишковим тиском 13,3 МПа. Із спечених пресовок вирізалися зразки для металографічного аналізу (визначення розміру та об'ємної частки пор) і механічних випробувань. Для відтворюваності дослідів на кожному поєднанні рівнів факторів виготовляли не менше п'яти зразків і визначали середнє значення. Результати проведених експериментів наведені у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Властивості досліджуваного спеченого титану за варійованими елементами

№ дослідів	D X_1	P X_2	Об'ємна частка пор Θ , %	Середній розмір пор $d_{\text{пор}}$, мкм	Твердість НВ	Границя міцності σ_B , МПа	Відносне подовження δ , %
1	0,71	900	7,0	68	93,9	340,1	9
2	0,19	900	3,8	21	199,1	405,1	7,2
3	0,71	500	33,0	120	79,6	275,7	4,8
4	0,19	500	17,9	46	151,0	332,9	3,0
5	0,45	700	8,5	54	140	366,3	6,9

Аналіз отриманих даних пористості та механічних властивостей показав, що усі дослідні характеристики проявляли значну чутливість до тиску пресування та розмірів порошку. Після регресійного оброблення наявних результатів досліджень за програмою «SigmaPlot» отримували рівняння залежності функцій відклику Y_i від змінних факторів X_1 та X_2 виду:

$$Y_i = B_0 + B_1 \cdot 4,6 \cdot X_1 - B_2 \cdot X_2 - B_3 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (3.2)$$

де B_0 – вільний член,

B_1 , B_2 та B_3 – відповідні коефіцієнти регресії.

В результаті отримали наступну систему рівнянь (3.3) – (3.7), що описують залежності пористості і механічних властивостей зразків від розміру порошку титану і тиску пресування. Без урахування статично незначущих коефіцієнтів, були отримані наступні регресійні рівняння в кодовому масштабі, де в якості функції відгуку Y були прийняті наступні показники: Y_1 – об'ємна частка пор Θ , Y_2 – середній розмір пор $d_{\text{пор}}$, Y_3 – твердість HB, Y_4 – границя міцності σ_B , Y_5 – відносне подовження δ :

$$Y_1 = 15,4 + 4,6 \cdot X_1 - 10 \cdot X_2 - 3 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (3.3)$$

$$Y_2 = 63,8 + 30,3 \cdot X_1 - 19,3 \cdot X_2 - 6,8 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (3.4)$$

$$Y_3 = 130,9 - 44,2 \cdot X_1 + 15,6 \cdot X_2 - 8,5 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (3.5)$$

$$Y_4 = 338,5 - 30,6 \cdot X_1 + 34,2 \cdot X_2 - 2 \cdot X_1 \cdot X_2, \quad (3.6)$$

$$Y_5 = 6 + 0,9 \cdot X_1 + 2,1 \cdot X_2. \quad (3.7)$$

Аналіз рівнянь (3.3–3.7) показує, що розмір порошку і тиск пресування впливали на дослідні показники по різному. Розмір порошку D має більш значні коефіцієнти у рівняннях (3.4) та (3.5), які в 1,6 і 2,8 рази відповідно вище коефіцієнтів при тиску пресування, що говорить про максимальну дію фракційного складу на розмір пор у пресовках та їх твердість. Тиск пресування в середньому у два рази сильніше впливає на об'ємна частка пор та відносне подовження пресовок - рівняння (3.3) та (3,7) відповідно. Величина впливу розміру порошку титану і тиску пресування на границю міцності пресовок практично однакова – рівняння (3.6).

Перевірка адекватності моделей показує, що їх можна використовувати для прогнозування значень функцій відгуку при будь-яких значеннях факторів, що знаходяться між верхнім і нижнім рівнями варіювання. Для цього доцільно

перейти до натуральних змінних, використовуючи формулу перекладу (3.8) [202, 203]:

$$X_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\delta_{0i}}. \quad (3.8)$$

Таким чином отримуємо:

- для розміру порошку

$$X_1 = \frac{D - 0,45}{0,26}, \quad (3.9)$$

- для тиску пресування

$$X_2 = \frac{P - 700}{200}. \quad (3.10)$$

Після цього рівняння (3.3–3.7) прийняли такий вид:

$$\Theta = 24,27 + 58,08D - 0,02P - 0,06DP, \quad (3.11)$$

$$d_{\text{пор}} = 37,72 + 208,08D - 0,04P + 0,013DP, \quad (3.12)$$

$$HB = 101,31 - 55,58D + 0,15P - 0,16DP, \quad (3.13)$$

$$\sigma_B = 259,65 - 90,77D + 0,19P - 0,04DP, \quad (3.14)$$

$$\delta = -2,91 + 3,46D + 0,01DP. \quad (3.15)$$

За допомогою отриманих рівнянь розраховано значення пористості і механічних властивостей виробів з титану в залежності від фракційного складу його порошків і тиску пресування (табл. 3.9).

Порівняння експериментальних (фактичних) і розрахункових даних (див. табл. 3.9) дозволяє зробити висновок про їх достатньо високу збіжність.

Таблиця 3.9 – Фактичні та розраховані властивості досліджуваного спеченого титану за варійованими елементами

№ досліджу	D X ₁	P X ₂	Об'ємна частка пор Θ , %		Середній розмір пор $d_{\text{пор}}$, мкм		Твердість HB		Границя міцності σ_B , МПа		Відносне подовження δ , %	
			ф.	р.	ф.	р.	ф.	р.	ф.	р.	ф.	р.
1	0,71	900	7,0	9,2	68	66,4	340,1	340,6	9,0	8,5	93,9	94,6
2	0,19	900	3,8	7,0	21	19,0	405,1	406,6	7,2	6,7	199,1	198,4
3	0,71	500	33,0	34,2	120	119,3	275,7	276,0	4,8	4,5	79,6	80,0
4	0,19	500	17,9	19,6	46	44,9	332,9	333,6	3,0	2,7	151,0	150,5
5	0,45	700	8,5	17,5	54	62,4	366,3	339,8	6,9	5,6	140,0	130,9
Коефіцієнт кореляції, r			0,965		0,993		0,967		0,985		0,996	
r^2			0,931		0,986		0,934		0,970		0,993	

Примітка: ф. – фактичні значення, згідно з результатами досліджень (див. табл. 3.2 і 3.3);
р. – розрахункові значення, відповідно до рівнянь (3.11–3.15).

3.6 Графічний аналіз рівнянь регресійних залежностей і оптимізація технології отримання порошкових виробів з титану

З метою визначення тиску пресування та фракційного складу порошку, що забезпечують отримання границі міцності порядку $\sigma_B \geq 345$ МПа та твердості HB > 130 при можливо більших значеннях пластичності, з використанням отриманих регресійних рівнянь, будували тривимірні графічні залежності (рис. 3.19 і 3.20), що ілюструють залежності пористості і механічних властивостей виробів з титану від розміру його порошків і тиску пресування.

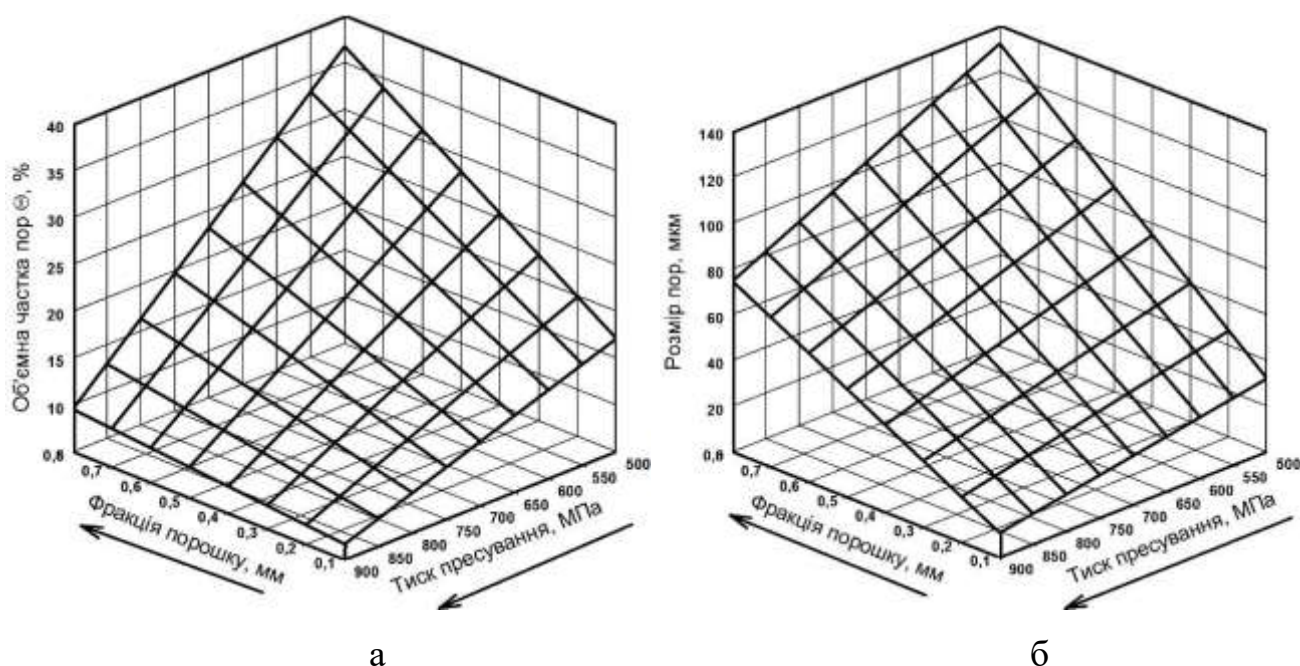
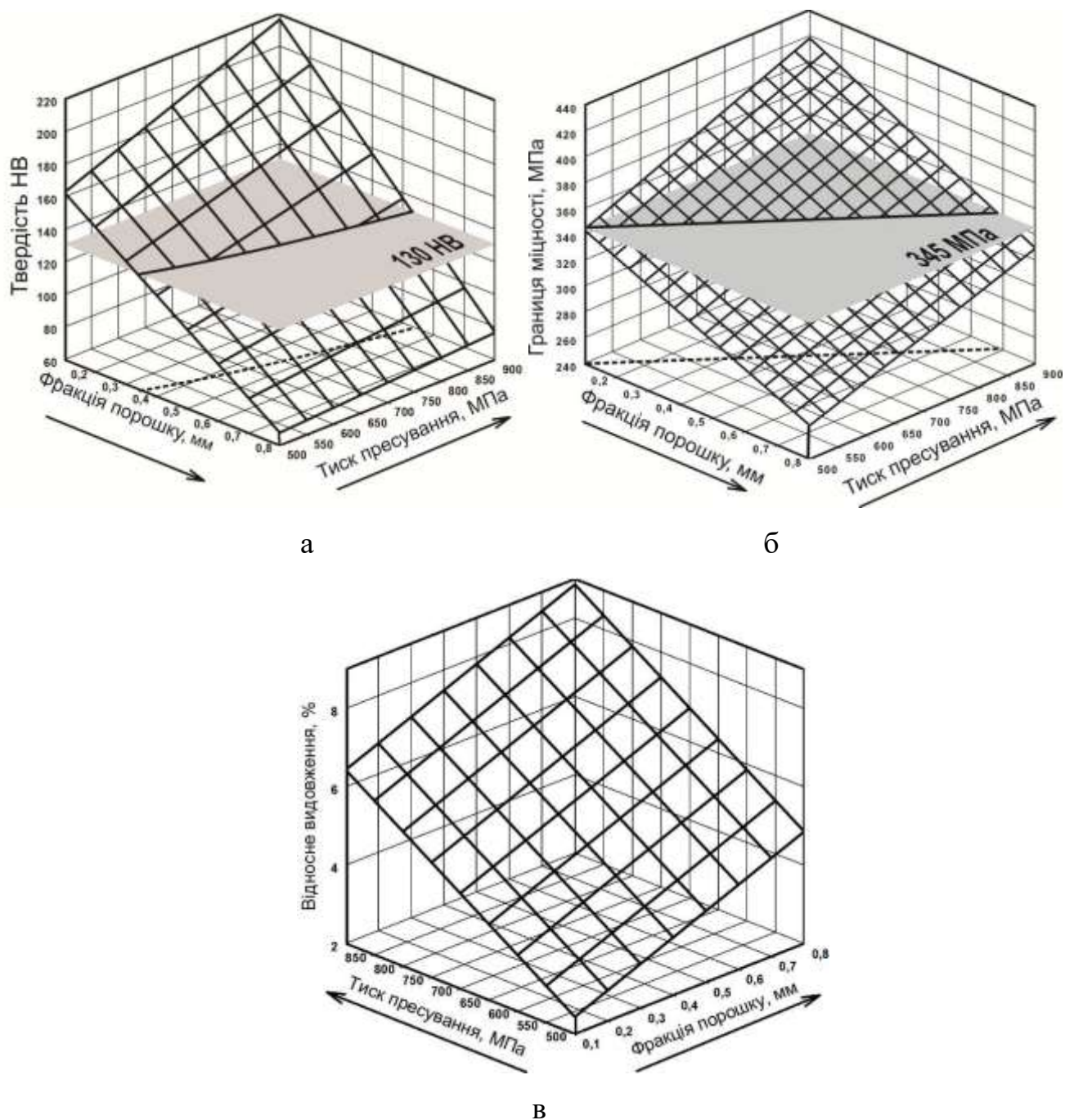


Рисунок 3.19 – Залежність об'ємної частки (а) і розміру пор (б) від розмірів порошку і тиску пресування

Аналіз показав, що розмір порошку входить в рівняння (3.3, 3.4) з позитивним знаком і підвищує об'ємну долю пор і їх розмір; в рівняння (3.5, 3.6) з негативним знаком і знижує твердість та границю міцності. Тиск пресування входить в означені рівняння з протилежними розміру порошку знаками і відповідно мав зворотний вплив на вказані характеристики (див. рис. 3.19 і 3.20, а, б). Наявність негативного знаку парного члена в рівнянні (3.3) говорить про більший вплив на об'ємну частку пор матеріалу тиску пресування, ніж розміру порошку (див. рис. 3.19, а). Наявність позитивного знаку парного члена в рівнянні (3.4) і негативних в (3.5, 3.6) говорить про більший вплив розміру порошку, ніж тиску пресування на розмір пор, твердість і границю міцності (див. рис. 3.19, б, 3.20, а, б). Наявність позитивних знаків при розмірі порошку та парному члені в рівнянні (3.7) говорить, що тиск пресування та розмір порошку підвищують відносне подовження зразків, що добре видно з представлених на рисунку 3.20 в даних.

Проведений аналіз рівнянь (3.3–3.7) дозволив встановити закономірності впливу комплексу параметрів (фракція порошку і тиск пресування) у межах їх

варіювання (див. табл. 3.6) на структуру і, як наслідок, механічні властивості спеченого технічного титану. При цьому слід зазначити, що отримані рівняння, які найбільш повно описують закономірності впливу (параметри порошкової металургії – властивості) спеченого технічного титану. Крім того, отримані залежності враховують ефект комплексної взаємодії параметрів.



а – твердість; б – границя міцності; в – відносне подовження

Рисунок 3.20 – Залежність механічних властивостей спечених заготовок від розмірів порошку і тиску пресування

З даних, представлених на рисунку 3.20, а, б випливає, що області параметрів порошкової металургії, відповідні заданим рівням твердості і границі міцності, знаходяться вище січних площин, що відповідають твердості 130 НВ та границі міцності 345 МПа.

Для визначення оптимального тиску пресування та фракційного складу порошку був побудований графік двомірних перерізів поверхні відгуку по двофакторному поліному, в який попередньо було введено бажані числові значення досліджуваних параметрів: НВ, σ_b (рис. 3.21). Область оптимальних значень дослідних факторів (заштрихована зона), відповідна даній вимозі лежить вище січних площин (пунктирна лінія), відповідних твердості 130 НВ і границі міцності $\sigma_b = 345$ МПа.

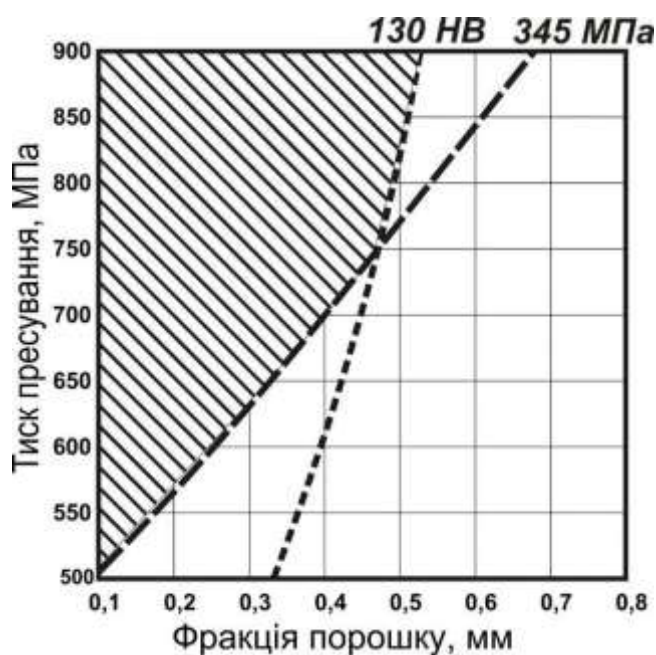


Рисунок 3.21 – Оптимізація параметрів порошкової металургії

Представлені залежності і матеріали досліджень дозволяють отримати порошковий титан, який по границі міцності відповідає вимогам ГОСТ 26492-85 для деформованих зразків зі сплаву ВТ1-0 ГОСТ 19807-91 і по твердості і границі міцності не поступається даному сплаву в литому стані. Таким чином, результати досліджень дозволяють рекомендувати параметри порошкової металургії для виробництва конструкцій і виробів широкого призначення, працездатність яких

визначається показниками міцності.

Результати цього розділу наведено в наступних публікаціях здобувача [204, 205, 206, 207].

3.7 Висновки до розділу 3

1. Досліджено вплив фракційного складу ($-0,8+0,1$ мм) порошків титану ПТ (ТУ 14-10-026-98) і тиску пресування (від 500 МПа до 900 МПа) на структуру, пористість і механічні властивості спечених заготовок, відповідних за хімічним складом технічному титану ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91).

2. Отримано графічні залежності границі міцності, відносного подовження, твердості, об'ємної частки і розміру пор від фракційного складу і тиску пресування. Встановлено, що збільшення тиску пресування і зниження фракції порошку призводить до підвищення міцності, твердості і зниження об'ємної частки і розміру пор.

3. Методом математичного планування експерименту вивчено вплив величини фракцій порошку і тиску пресування на об'ємну частку пор, їх розмір і механічні властивості титанових заготовок. Отримані залежності дозволяють прогнозувати величину пористості і рівень механічних властивостей титанових порошкових виробів в залежності від технологічних факторів виробництва.

4. Визначені допустимі величини фракцій порошку титану і тиску пресування для забезпечення заданого рівня механічних властивостей: $\sigma_b \geq 345$ МПа, $HB > 130$, $\delta = 7 \dots 8$ %, $\psi = 14,2 \dots 19,1$ %, $KCU = 87,8 \dots 108,3$ Дж/см².

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ СПОСОБІВ ЗВАРЮВАННЯ НА ХІМІЧНИЙ СКЛАД, МЕХАНІЧНІ ТА СЛУЖБОВІ ВЛАСТИВОСТІ СПЕЧЕНОГО ТИТАНУ

Для з'єднання заготовок з технологічної точки зору найбільш раціональним є зварювання в твердій фазі, що володіє рядом переваг перед зварюванням плавленням. Крім загальновідомих недоліків, при використанні спечених заготовок зварні з'єднання, виконані зварюванням плавленням, мають підвищену пористість в високотемпературній області зони термічного впливу [208], а також мають нестабільні механічні властивості, тому що концентрація і геометрія пор істотно впливає на властивості виробу, будучи концентратором напружень і визначаючи характер руйнування [164, 165].

Метою досліджень, проведених в розділі 4, було визначення обмежень застосування способів зварювання без розплавлення із середньоінтенсивним силовим впливом для спечених заготовок з титанових сплавів. Як показано в розділі 1, використання при зварюванні сплавів в спеченому стані може привести до наявності в звареному шві і колошовній зоні неприпустимої кількості спадкових дефектів, викликаних недосконалістю вихідної заготовки; необхідний контроль вмісту домішок, що потрапляють з навколишнього середовища для запобігання деградації властивостей, також необхідна корекція параметрів зварювання пористих матеріалів. У зв'язку з цим, для більш широкого застосування титану, необхідно провести дослідження зварюваності, яке має особливе значення при виготовленні напівфабрикатів, спечених титанових заготовок.

Необхідно встановити взаємозв'язок службових властивостей зварних з'єднань спечених заготовок з титанових сплавів з особливостями структурного стану матеріалу і особливостями його зміни при технологічному впливі.

Для досліджень зварюваності порошкових матеріалів виготовляли зразки для механічних випробувань (див. рис. 2.2, а, г) шляхом пресування порошків

фракції $-0,45+0,28$ мм на гідравлічному пресі під тиском 700 МПа з наступним спіканням при $1250^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ протягом 180 хв. Хімічний склад і механічні властивості (табл. 4.1) спечених зразків, виготовлених способами порошкової металургії, відповідали вимогам, що пред'являються до сплаву типу BT1-0.

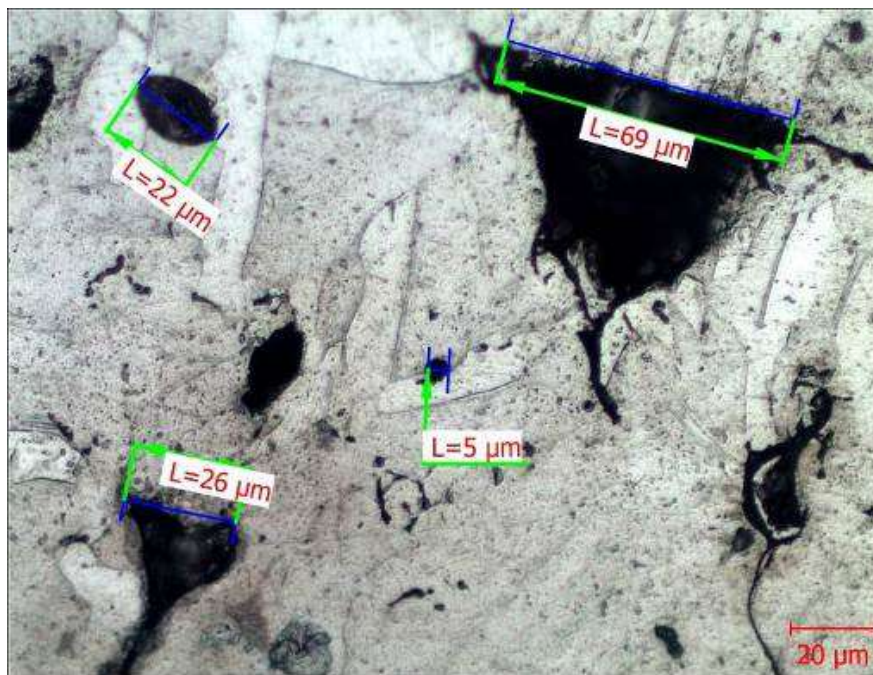
Таблиця 4.1 – Механічні властивості спечених зразків з технічного титану для дослідження зварюваності

$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %	$\text{HB} \cdot 10^{-1}$, МПа
365,5...380,8	6,4...7,1	15,3...16,9	149,2...158,4

Структуру зразків було представлено розорієнтованими пластинами α -фази з зернами розміром 40...70 мкм, по тілу і границях яких розташовувалися пори. Розміри і форма поліедрів і пор були різні (рис. 4.1). Пори в зразках переважно мали неправильну форму, їх розмір був у межах від 5 до 69 мкм, об'ємна частка пор в даних зразках становила 5...7 %.

Досліджували вплив способу зварювання на структуру і механічні властивості (границя міцності $\sigma_{\text{в}}$, МПа; відносне подовження δ , %) зварних з'єднань. Величину зон шву і термомеханічного впливу (ЗТМВ), визначали по зміні структури на поздовжній осі зразків. У зв'язку з обмеженою інформацією про зварювання спечених сплавів титану спочатку необхідно було провести апробацію технологічної можливості зварювання спеченого титану методами зварювання тиском.

Найбільш перспективними серед всіх способів зварювання без розплавлення є способи зварювання з середньоінтенсивним силовим впливом. Це обумовлено можливістю отримувати якісні зварні з'єднання за невеликий проміжок часу. Способи зварювання з низькоінтенсивним силовим впливом здійснюють за відносно тривалий час; способи зварювання з високоінтенсивним силовим впливом на увазі мінімальної тривалості процесу характеризуються низькими пластичністю і ударною в'язкістю [209].



L – максимальний лінійний розмір пори $d_{\text{пор. max}}$ (див. табл. 3.3)

Рисунок 4.1 – Мікроструктура спечених заготовок (цифри – розміри пор)

Зварювання проводили трьома способами (див. розділ 2). Дослідження зварювання стикового оплавленням і тертям конвекційним проводили на спечених заготовках діаметром 10–12 мм і довжиною 55 мм, зварювання тертям перемішуванням – на заготовках у вигляді пластин товщиною 2 мм, шириною 30 мм і довжиною 110 мм.

4.1 Зварювання спеченого титану

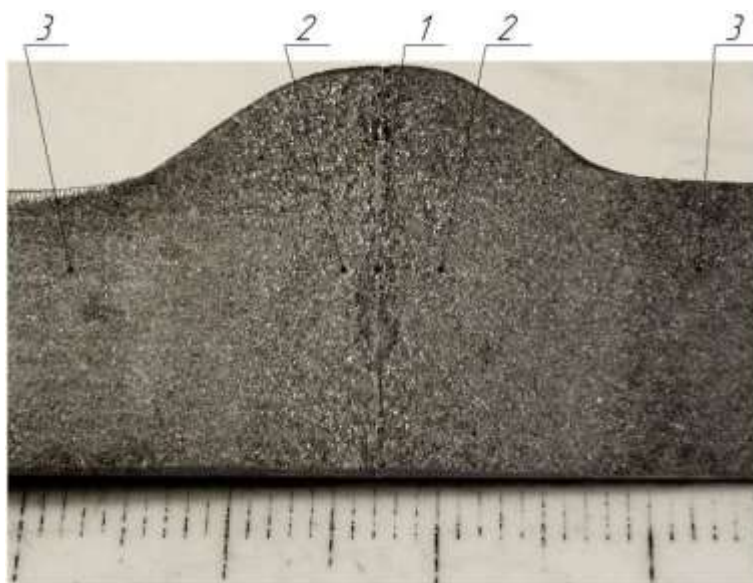
4.1.1 Стикове зварювання оплавленням

Візуальний огляд зварних заготовок (рис. 4.2) дозволив встановити, що видавлювання грату відбувалося по всьому колу стику. Це побічно свідчить про задовільне формування шву і про видалення з нього неметалевих включень. В результаті осадки кожна із заготовок, яка з'єднувалась, зазнавала вкорочення $8,2 \text{ мм} \pm 0,2 \text{ мм}$.



Рисунок 4.2 – Вигляд зварного з'єднання заготовки із спеченого титану ВТ1-0, отриманого контактним стиковим зварюванням оплавленням

Фон зразка після травлення в основному металі матовий (рис. 4.3), в шві і ЗТМВ з елементами блиску. Це свідчило про збільшення розмірів α -зерен в результаті перегріву при зварюванні: розміри макрозерен в зварному шві і ЗТМВ становили 2000...3000 мкм, в основному металі до 1000 мкм.



1 – область зварного шву; 2 – ЗТМВ; 3 – ЗТВ

Рисунок 4.3 – Макроструктура зварного з'єднання заготовки із спеченого титану ВТ1-0, отриманого контактним стиковим зварюванням оплавленням

В результаті кількісної оцінки параметрів зварного з'єднання встановлено, що ширина зварного шву знаходилась в межах 250...1750 мкм, ЗТМВ – 15...20 мм (див. рис. 4.3). При цьому ЗТМВ характеризувалася наявністю β -перетворених колоній розмірами близько 205 мкм (рис. 4.4, а). Така структура характерна для зварних з'єднань литих титанових сплавів.

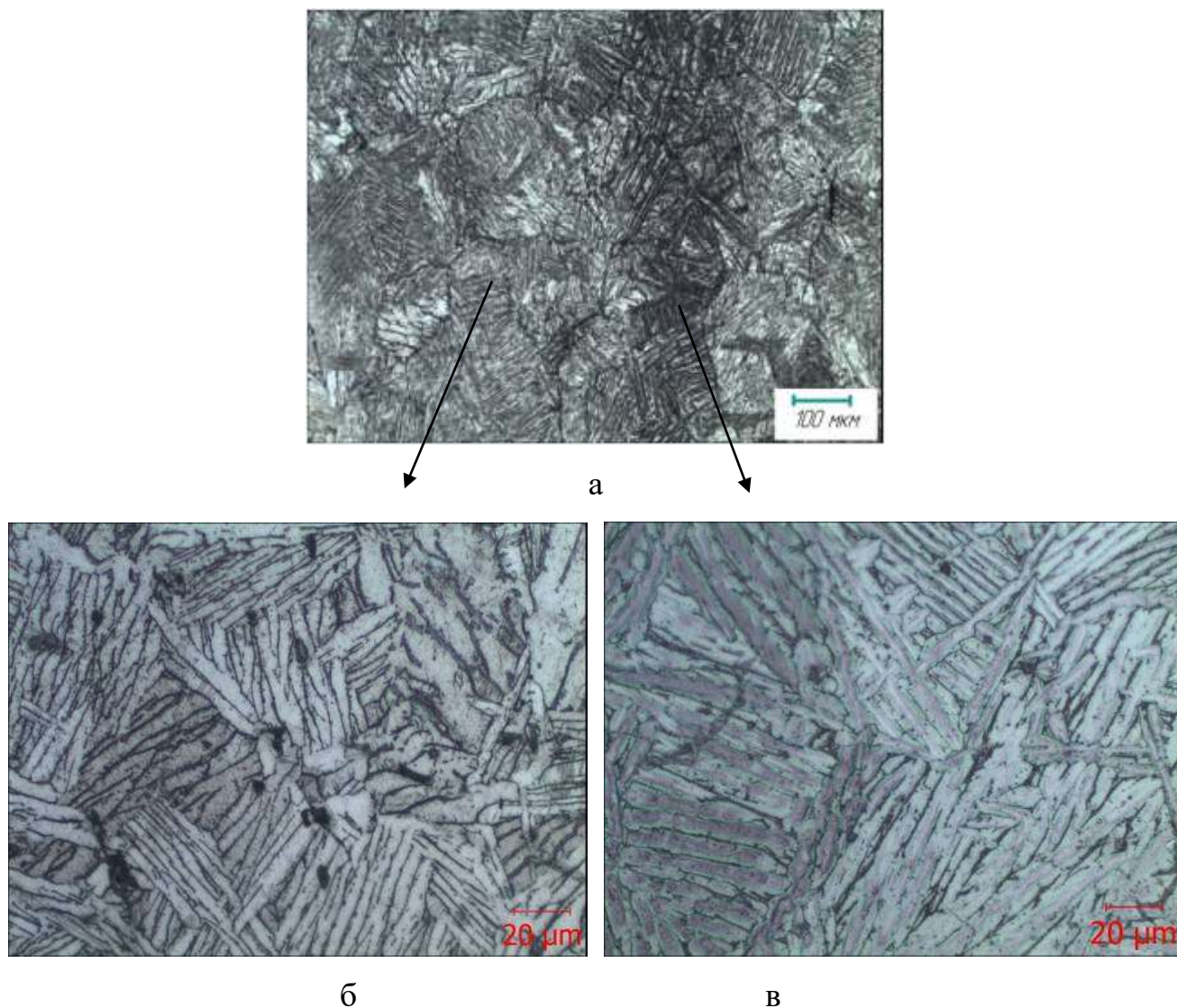
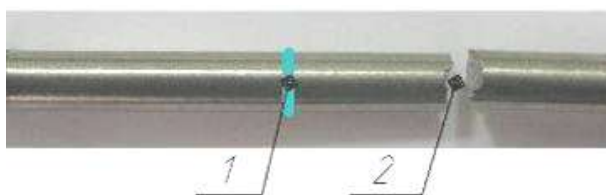


Рисунок 4.4 – Мікроструктура зварного з'єднання (а), зони термомеханічного впливу (б) і зварного шву (в) заготовки із спеченого титану VT1-0, отриманого контактним стиковим зварюванням оплавленням

Мікроструктура ЗТМВ зварного з'єднання (рис. 4.4, б) мала тонкопластинчасту будову, яка складалась з пачок паралельних пластин α -фази з різним кристалографічним орієнтуванням. Аналогічну, але більш грубопластинчасту будову мав шов (рис. 4.4, в).

У металі шва об'ємна частка пор дорівнювала 0,5...1,0 %, а їх розмір не перевищував 2 мкм. У ЗТМВ пори мали одиничний характер, розміри до 10 мкм, розташовувалися переважно на межах пластин α -фази, об'ємна частка пор складала 1...4 %.

При визначенні найбільш слабкої ділянки зварного з'єднання руйнування зварених порошкових зразків, як правило, відбувалося в зоні, віддаленій від зварного шву, тобто по основному металу (рис. 4.5). В цілому, значення механічних властивостей зварних з'єднань спечених титанових сплавів знаходились на рівні вихідних заготовок ($\sigma_b = 367...380$ МПа, $\delta = 6,4...7,1$ %, $\psi = 15,2...16,5$ %). Причиною цього є формування металу підвищеної густини з дисперсною структурою в області зварного шву. Така будова сприяла підвищенню міцності в порівнянні з основним металом спеченої заготовки.



1 – зварний шов; 2 – місце руйнування

Рисунок 4.5 – Зразок визначення межі міцності найбільш слабкої ділянки зварного з'єднання після випробувань на розтягання

При визначенні границі міцності зварного шву встановлено, що вона на 7,6...19 % вище ніж границя міцності основного металу і становила $\sigma_b = 409...437$ МПа (пластичні властивості металу шву згідно ГОСТ 6996-66 не визначаються). Це можна пояснити формуванням в зоні стику більш щільного металу з меншою кількістю пор, а також зменшенням їх розмірів (6...15 мкм).

Результати фрактографічного аналізу зразків для випробування міцності металу шву (рис. 4.6) дозволили встановити, що характер руйнування зразків, отриманих стиковим зварюванням оплавленням був в основному в'язкий. У той же час, деякі ділянки поверхні мали ознаки крихкого руйнування. Це свідчить про те, що пори не завжди були ініціаторами зародження тріщин.

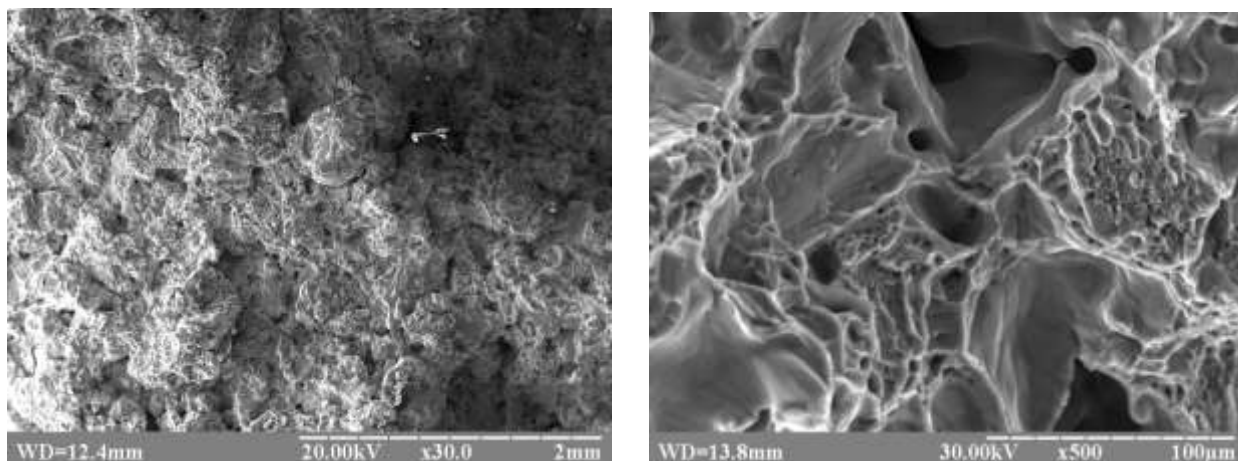


Рисунок 4.6 – Фрактограми поверхні руйнування зразків для випробування міцності металу шву із спеченого титану BT1-0, отриманого контактним стиковим зварюванням оплавленням

4.1.2 Конвекційне зварювання тертям

Зварювання тертям, на відміну від зварювання плавленням, здатне забезпечити рівномірність зварного шву і основного металу [94]. Тому, необхідною умовою отримання якісного зварного з'єднання було використання якісного спеченого матеріалу.

Основними критеріями якісного зварного з'єднання при визначенні раціональних режимів зварювання приймалися: мінімальна величина осадки і міцність зварного з'єднання не нижче міцності основного металу. Основними параметрами процесу зварювання тертям є тиск при нагріванні P_n , час нагрівання t_n або величина осадки Δl , частота обертання n , а також тиск проковування $P_{пр}$ і час проковування $t_{пр}$.

Якість зварних з'єднань при конвекційному зварюванні тертям залежить від поєднання наступних технологічних параметрів: кільцева швидкість, тиск і час. Зазвичай ці параметри визначають шляхом порівняння механічних властивостей з'єднань, отриманих при різних режимах [210]. У нашому випадку завдання ускладнюються необхідністю врахування низки інших факторів, що впливають на

створення зварного з'єднання. До них відносяться: стан постачання і попередньої термічної обробки матеріалу [211]; пористість і вихідний фракційний склад спеченого матеріалу.

Згідно з рекомендаціями [212, 213], для титану частота обертання для заданого діаметру зварювальних зразків повинна складати $n = 80 \dots 100 \text{ с}^{-1}$, а окружна швидкість $v = 4 \dots 5 \text{ м/с}$ (згідно з розрахунками для зразків діаметром 10 мм значення зменшується до $v = 3,14 \text{ м/с}$). Там же зазначено, що «діапазон рекомендованих окружних швидкостей може бути істотно розширено». В [214] наводиться також швидкість відносної частоти обертання деталі $n = 80 \dots 100 \text{ с}^{-1}$, для зварювання титану рекомендується $v = 2,0 \dots 2,5 \text{ м/с}$, що більш ніж в 1,5 рази нижче розрахункових значень. Дослідження [94] проводилися на зразках діаметром 10 мм сплаву ВТЗ-1 при $n = 23,83 \text{ с}^{-1}$ ($v = 0,75 \text{ м/с}$), що більш ніж в 3...4 рази нижче рекомендованих значень. При цьому були отримані якісні зварні з'єднання з міцністю, що перевищує міцність основного металу.

Істотний вплив на режими зварювання тертям надають теплофізичні властивості зварювальних матеріалів. Теплопровідність і температуропровідність матеріалів, які зварюються, визначають ступінь розсіювання тепла в колошовній зоні та її протяжність. У свою чергу температура впливає на структурний стан зони зварного з'єднання і її характеристики. Опір деформації при високих температурах істотно діє на потужність тепловиділення, і відповідно, на час нагрівання t_n , необхідний для початку пластичної деформації матеріалу.

Зі зниженням густини знижується швидкість відводу тепла від шву до основного металу. Тому при зварюванні спечених зразків необхідно менший час нагрівання t_n , ніж при зварюванні компактних, відповідно і протяжність колошовної зони спечених зразків повинна бути менше. Наявність пористості само по собі передбачає менший тиск і час до початку пластичної деформації. Зварювання виконували відповідно до даних, наведених в [94], згідно з якими забезпечується рівномірність зварного з'єднання компактного титану. З метою виключення впливу конструктивних особливостей обладнання, зварювання тертям прутків проводилось на такому ж обладнанні.

На підставі літературних даних і власного досвіду параметрами режиму зварювання були прийняті: час нагрівання 2,2 с, тиск при нагріванні 15,28 МПа, частота обертання $n = 23,83 \text{ с}^{-1}$, тиск проковування дорівнював тиску нагрівання (особливості використовуваної машини) $P_{\text{пр}} = P_{\text{н}}$, максимальний діаметр зразків $d = 10 \dots 12 \text{ мм}$ так само обумовлений технічними можливостями машини і її затискних пристроїв. Час нагріву $t_{\text{н}}$ і осадки при нагріванні Δl є взаємопов'язаними параметрами при сталому процесі, що дозволяє регламентувати (обмежувати його тривалість) процес зварювання або за часом нагріву, або за величиною осадки.

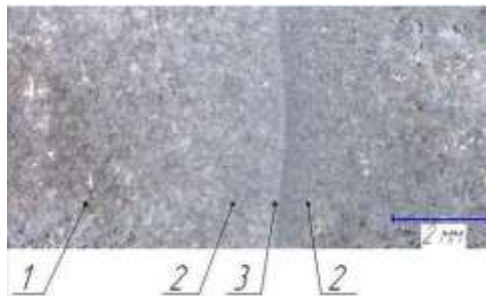
Візуальний огляд зварених заготовок (рис. 4.7) дозволив встановити, що видавлювання ґрату відбувалося по всьому колу стику. Це побічно свідчить про задовільне формування шву. В результаті осадки кожна із заготовок, яка з'єднувалась, зазнавала скорочення 5...7,5 мм.



Рисунок 4.7 – Зовнішній вид зварного з'єднання зразків із спеченого титану BT1-0, виконаного конвекційним зварюванням тертям

Макроструктура з'єднання не мала тріщин, розшарування, металевих і неметалевих включень, видимих неозброєним оком. Згідно результатів

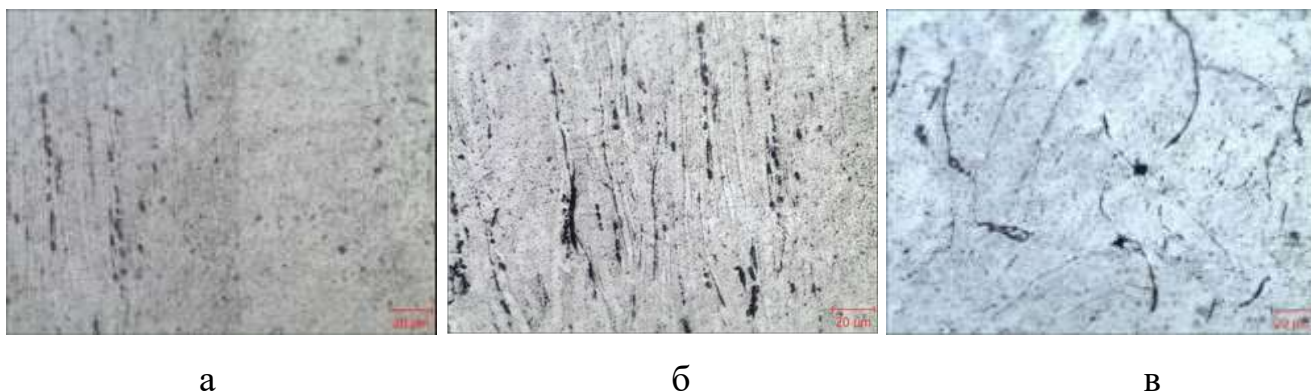
металографічного аналізу, ширина зварного шву знаходилась в межах 0,08...1,25 мм; на відстані 2,0...2,5 мм від шву в обох заготовках утворилася зона без видимих пор, які мали місце в основному металі зразків (рис. 4.8).



1 – основний метал; 2 – колошовна зона; 3 – шов

Рисунок 4.8 – Макроструктура зварного з'єднання зразків із спеченого титану VT1-0, виконаного конвекційним зварюванням тертям

Встановлено, що в металі шву практично були відсутні пори і мали місце структурні складові з чітко видимими межами розділу (рис. 4.9, а). Мікроструктура шву складалася з фрагментів зерен α -фази, розмірами до 5 мкм, які утворилися в результаті інтенсивної деформації металу під дією тиску і тертя, при цьому розмір виявлених пор не перевищував 3 мкм, що свідчило про зменшення пор і можливе їх «заліковування» під дією зсувної деформації.



а – шов; б – ЗТМВ, перехідна від шву; в – ЗТМВ, перехідна від основного металу;

Рисунок 4.9 – Мікроструктура зварного з'єднання зразків із спеченого титану VT1-0, виконаного конвекційним зварюванням тертям

Слід зазначити, що структура ЗТМВ зварних заготовок (рис. 4.9, б) мала відмінності від структури основного металу. Вона мала тонкопластинчасту структуру і складалася з радіально орієнтованих пластин α -фази шириною до 3 мкм і довжиною до 150 мкм, по межах яких розташовувалися пори розмірами 2 мкм $\times$ 15 мкм, об'ємна частка пор складала 1...4 %. Формування радіального орієнтування і «заліковування» пор викликано дією температури і осьової сили при осадці. Аналогічний ефект має місце при обробці прутків і литих деталей з титанових сплавів методами інтенсивної пластичної деформації або в газостаті [215]. У той же час, ЗТМВ, розташована біля основного металу заготовки, складалася з пластин α -фази неправильної форми, з розмірами приблизно (10 $\times$ 50) мкм, пори в даній зоні мали серповидну форму (рис. 4.9, в) і розташовувалися довільно, крім цього в структурі були присутні одиничні округлі пори розміром 4...5 мкм.

В цілому, металографічні дослідження дозволили встановити, що в ЗТМВ розмір пор і їх кількість була меншою, ніж в основному металі, при цьому мав місце ефект часткового або повного «заліковування» пор. У зварному шві пори практично були відсутні, а залишкові мали розміри на порядок менші, ніж в основному металі.

Мікрорентгеноспектральним якісним аналізом зварного з'єднання встановлено, що характер розподілу основних домішкових елементів (азоту, кисню, заліза) був практично однаковим у всіх ділянках зразків (рис. 4.10).

Мікрорентгеноспектральним кількісним аналізом шву і зон з обох сторін шву (рис. 4.11) встановлено, що кількість основних домішкових елементів в спеченому металі не перевищувало вимог ГОСТ 19807-91 для сплаву ВТ1-0 (див. табл. 3.2). Отже, зварювання тертям без газового захисту не призводило до насичення зварного шву і ЗТМВ газами з навколишньої атмосфери.

Механічні випробування досліджуваних зварних зразків дозволили встановити, що рівень міцності зварного шву ($\sigma_b = 432...460$ МПа) в середньому на 25 % перевищував границю міцності вихідних спечених заготовок (див. табл. 4.1) оскільки в шві формувалася дисперсна мікроструктура з одиничними порами.

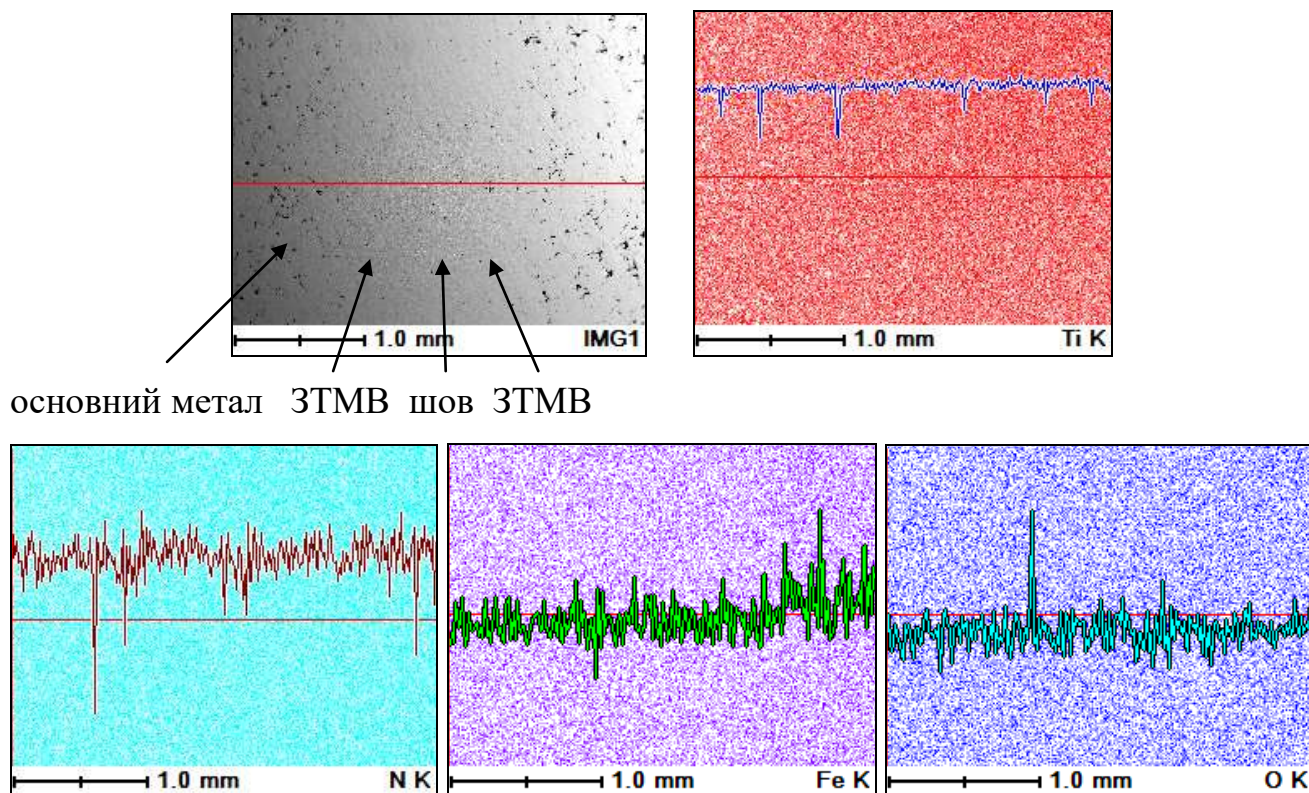
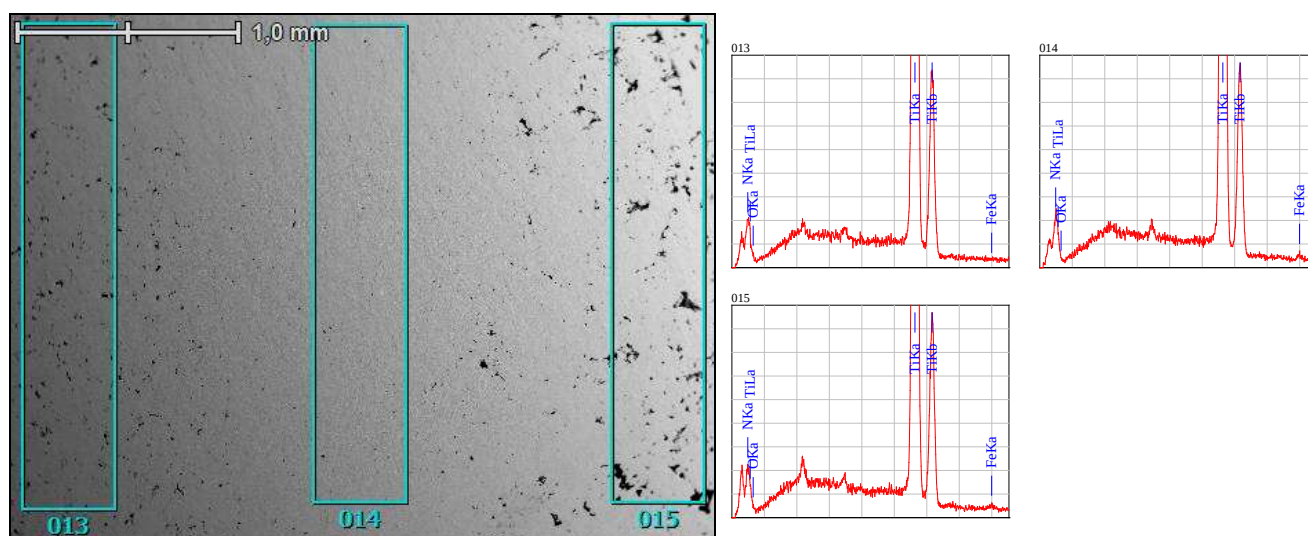


Рисунок 4.10 – Енергодисперсійний рентгеноспектральний якісний мікроаналіз розподілу елементів в зварних зразках спеченого титану BT1-0, виконаного конвекційним зварюванням тертям

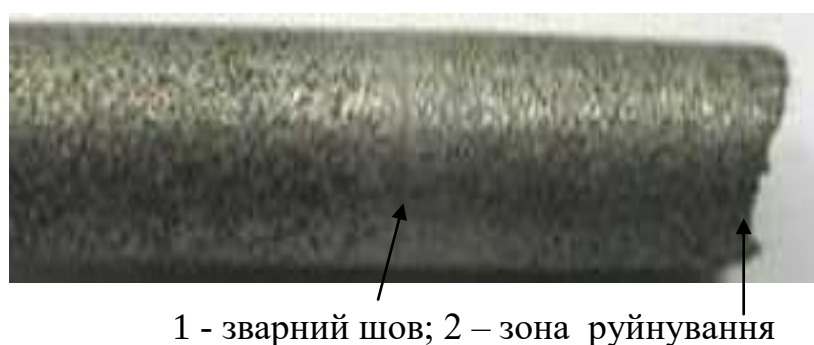
Руйнування зразків для визначення межі міцності найбільш слабкої ділянки зварного з'єднання відбувалося поза зоною зварного шву – по основному металу (рис. 4.12), в яких знаходилися пори в кількості близько 7 %, що знижують деформаційну здатність металу. При цьому механічні властивості були на рівні основного металу: $\sigma_b = 365 \dots 380$ МПа, $\delta = 6,4 \dots 7,1$ %, $\psi = 15,4 \dots 16,3$ %.

Результати фактографічного аналізу зразків для випробування міцності металу шву (рис. 4.13) дозволили встановити, що характер руйнування зразків, отриманих конвекційним зварюванням тертям був у порівнянні зі стиковим зварюванням оплавленням, більш енергоємний, з ямками в'язкого руйнування. У той час, при руйнуванні зразків, що отримані, зварюванням оплавленням, мали місце області крихкого руйнування.



№ точки	Ti	N	O	Fe
013 (основний метал)	основа	$0,030 \pm 0,001$	$0,15 \pm 0,01$	$0,20 \pm 0,01$
014 (шов)	основа	$0,013 \pm 0,001$	$0,18 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,01$
015 (основний метал)	основа	$0,035 \pm 0,001$	$0,15 \pm 0,01$	$0,28 \pm 0,01$

Рисунок 4.11 – Енергодисперсійний рентгеноспектральний кількісний мікроаналіз розподілу елементів в зразках спеченого титану BT1-0, виконаного конвекційним зварюванням тертям



1 - зварний шов; 2 – зона руйнування

Рисунок 4.12 – Зовнішній вид зразків для визначення межі міцності найбільш слабкої ділянки зварного з'єднання із спеченого титану BT1-0, виконаного конвекційним зварюванням тертям після випробувань на розтягання

Таким чином конвекційне зварювання тертям надає більш сприятливий вплив на структуру, механічні властивості і характер руйнування зразків ніж стикове зварювання оплавленням.

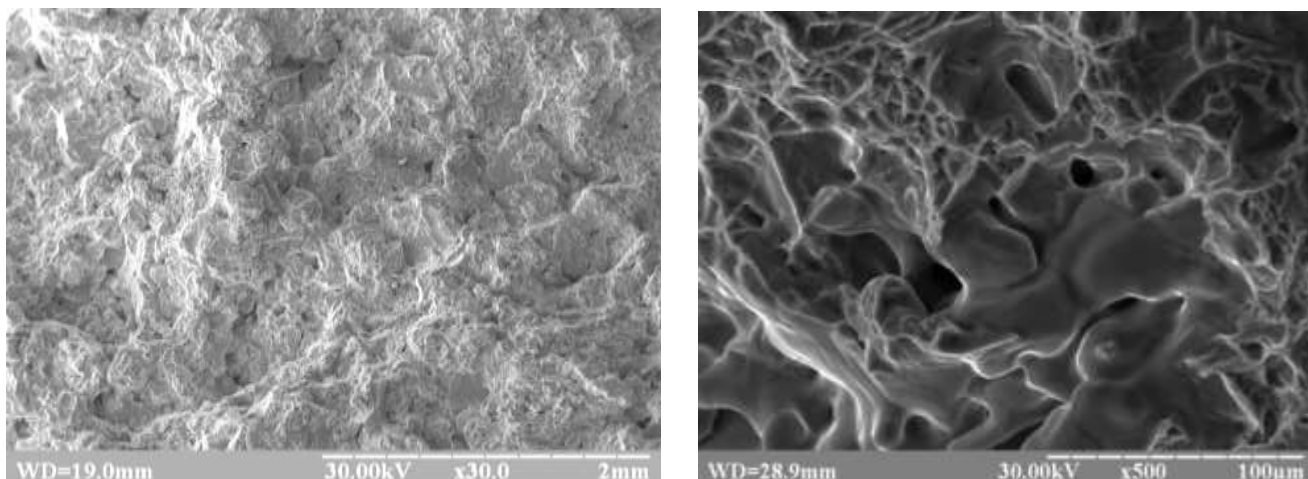


Рисунок 4.13 – Фрактограма поверхні руйнування зразків для випробування міцності металу шву із спеченого титану BT1-0, виконаного конвекційним зварюванням тертям

Це можна пояснити наявністю радіальної складової навантаження, котра дозволила підсилити подрібнення структурних складових.

4.1.3 Зварювання тертям перемішуванням

Візуальний огляд зварних заготовок (рис. 4.14) та аналіз макроструктури (рис. 4.15, а) дозволив встановити, що в результаті впливу інструменту зварний шов мав заниження та рельєф поверхні, який відповідає формі інструменту. Ширина зварного шву дорівнювала 20 мм, що відповідало діаметру зварювального інструменту, зони термомеханічного впливу – 2,5...4,1 мм.



Рисунок 4.14 – Вид зварного з'єднання зразків із спеченого титану BT1-0, виконаного зварюванням тертям перемішуванням

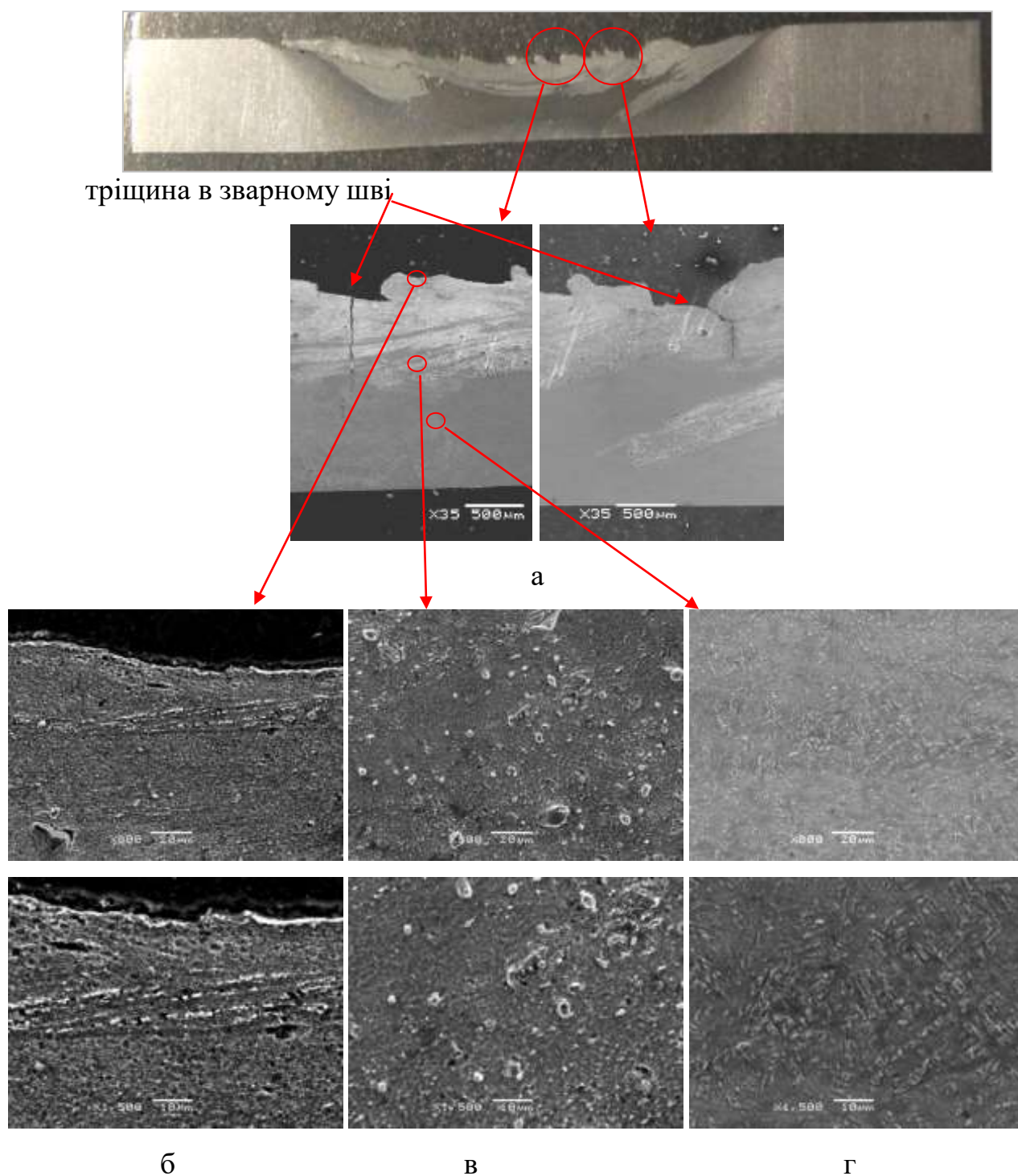


Рисунок 4.15 – Макро- (а) і мікроструктура (б, в, г) зварного з'єднання заготовки із спеченого титану BT1-0, отриманої зварюванням тертям перемішуванням

При дослідженні зварного з'єднання встановлено, що поверхня шву нерівна з найбільшою висотою нерівностей профілю до 600 мкм, що виникли через вплив зварювального інструменту. У верхній частині шву були наявні поодинокі

тріщини довжиною до 900 мкм, спрямовані нормально до поверхні зварних заготовок, а також голчасті пластини світлого кольору орієнтовані в напрямку обертання інструменту шириною до 3 мкм і довжиною до 10 мкм; поруч розташовувалися видовжені пори розмірами до 3 мкм × 10 мкм, що свідчило про зменшення пор і можливе їх «заліковування» під дією зсувної деформації (рис. 4.15, б).

У середній частині шву (рис. 4.15, в) мали місце округлі включення білого кольору і пори округлої і серповидної форми розміром до 20 мкм. У нижній частині металу шву майже були відсутні структурні складові з чітко видимими межами розділу (рис. 4.15, г). Зона термомеханічного впливу мала тонкопластинчасту структуру і складалася з радіально орієнтованих пластин α -фази шириною до 3 мкм і довжиною до 50 мкм, по межах яких розташовувалися пори округлої і серповидної форми розміром до 20 мкм (див. рис. 4.15, в), об'ємна частка пор дорівнювала 1...5 %.

Формування радіального орієнтування і «заліковування» пор (див. рис. 4.15) було викликано дією осьової і окружної сили при обертанні інструменту. В цілому, металографічні дослідження дозволили встановити, що в зварному шві і ЗТМВ розмір залишкових пор і їх кількість були меншими, ніж в основному металі, також мав місце ефект часткового або повного «заліковування» пор. Мікрорентгеноспектральним якісним аналізом шву встановлено, що характер розподілу основних домішкових елементів був нерівномірним (рис. 4.16), у порівнянні з попередніми видами зварювання.

За даними МРСА при зварюванні тертям перемішуванням вміст кисню та азоту в зварному шві і зонах термомеханічного впливу був в 1,2...1,3 рази вищим у порівнянні з попередніми видами зварювання і нерівномірним – з явними концентраційними сплесками, що свідчить про їх існування у виді оксидів і нітридів. Мікрорентгеноспектральним кількісним аналізом шву (рис. 4.17) встановлено, що кількість основних домішкових елементів у верхній частині шву (рис. 4.17 а, б) перевищувала допустимі вимоги ГОСТ 19807-91 для сплаву ВТ1-0 (див. табл. 3.2), центральна частина шву відповідала цим вимогам.

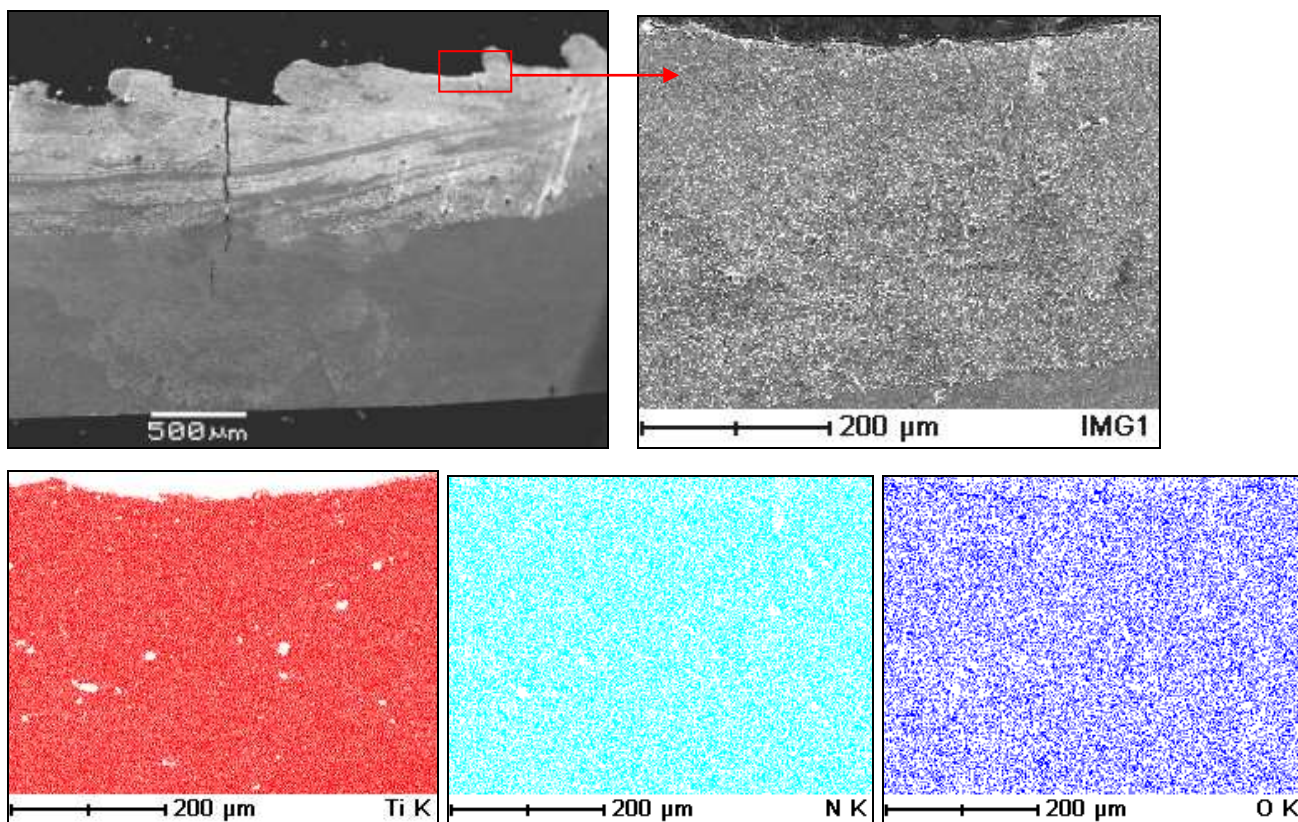


Рисунок 4.16 – Енергодисперсійний рентгеноспектральний якісний мікроаналіз розподілу елементів в зварних зразках із спеченого титану VT1-0, виконаного зварюванням тертям перемішуванням

Отже, зварювання тертям перемішуванням без попереднього очищення поверхні спеченого титану призводить до насичення зварного шву включеннями з поверхні заготовки та з навколишньої атмосфери. Це, як відомо, негативно впливає на механічні властивості зварного з'єднання.

Руйнування зразків при визначенні границі міцності найбільш слабкої ділянки зварного з'єднання в більшості випадків відбувалося в зоні зварного шву, в якому знаходилися велика кількість тріщин та включення (див. рис. 4.15-4.17), що знижують деформаційну здатність металу. Границя міцності ($\sigma_b = 222...240$ МПа) була приблизно в 1,5 рази нижче рівня міцності основного матеріалу (див. табл. 4.1). Пластичні характеристики також були в декілька разів нижче ($\delta = 2,2...2,7$ %, $\psi = 4,5...5,1$ %), ніж у вихідному матеріалі (див. табл. 4.1). При визначенні границі міцності зварного шву ($\sigma_b = 231...245$ МПа) встановлено, що вона аналогічна границі міцності найбільш слабкої ділянки зварного

з'єднання.

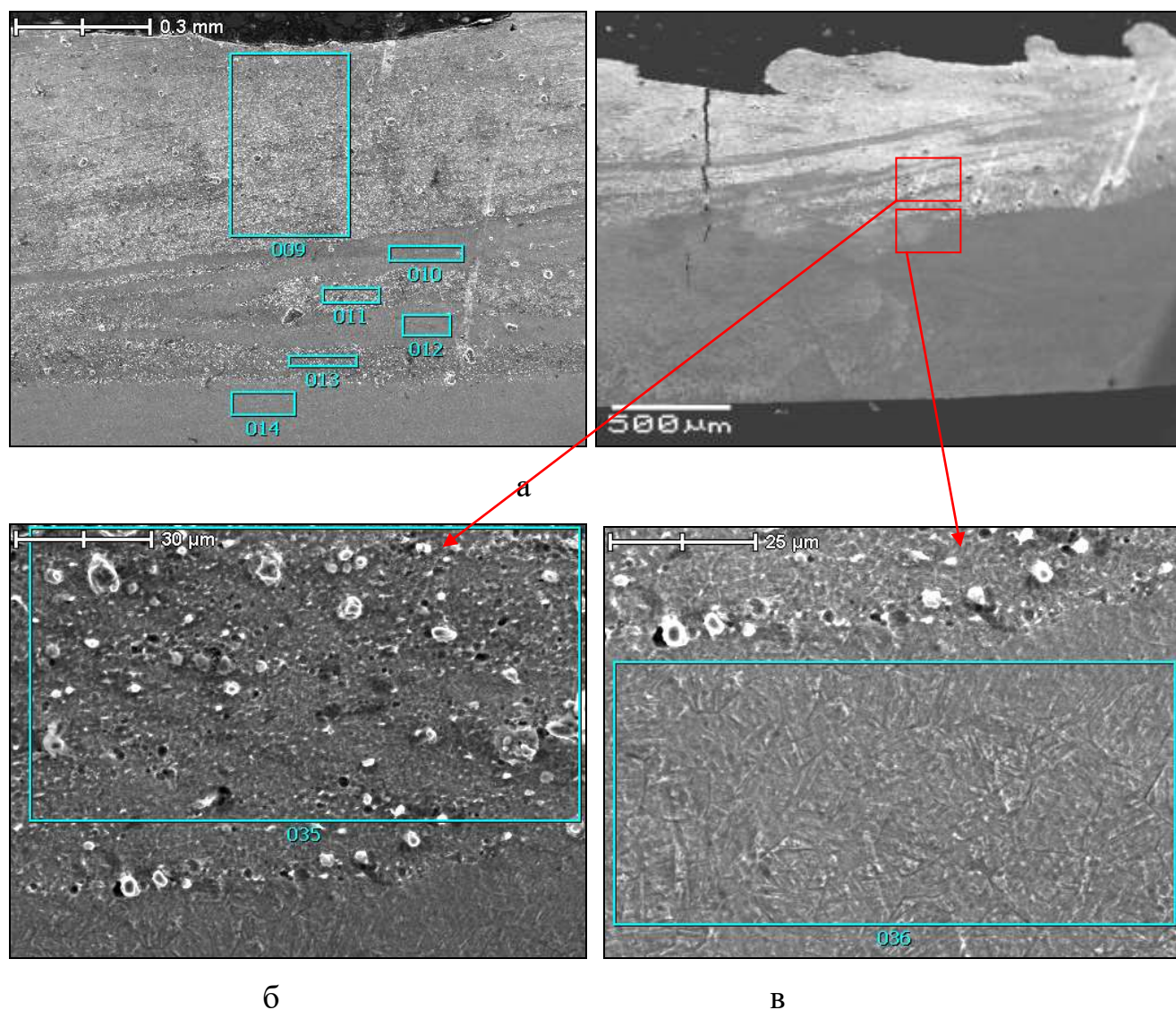
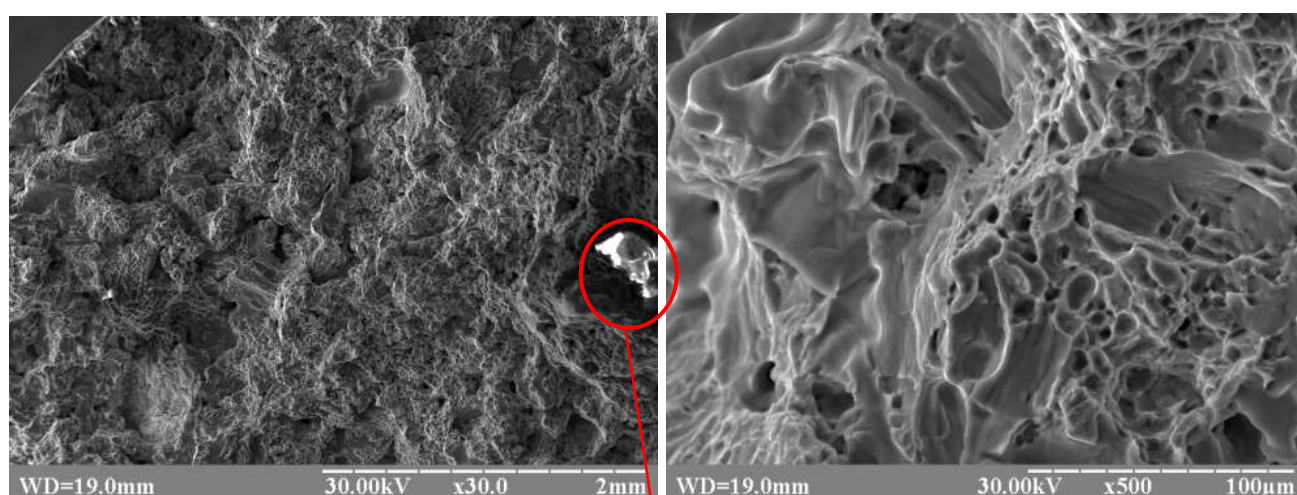


Рисунок 4.17 – Результати рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) розподілу елементів (дані наведені в табл. 4.2) по виділеним квадратам в зварному шві зразків із спеченого титану BT1-0, виконаного зварюванням тертям перемішуванням

Результати досліджень поверхні руйнування дозволили встановити, що характер руйнування зразків, які отримано зварюванням тертям перемішуванням, був крихким, руйнування відбувалося в основному в області тріщин та оксидних включень і пор (див. рис. 4.17, 4.18).

Таблиця 4.2 – Вміст домішкових елементів в металі шву зразків із спеченого титану BT1-0, виконаного зварюванням тертям перемішуванням

№ точки	Вміст елементів, мас. часток %		
	N	O	Fe
009	0,25	1,19	0,25
010	1,28	0,15	0,21
011	1,61	1,13	0,23
012	0,22	0,78	0,21
013	0,67	0,25	0,20
014	0,030	0,20	0,19
035	0,32	1,00	0,23
036	0,28	0,18	0,22



оксидне включення

Рисунок 4.18 – Фрактограма поверхні руйнування зварного шву розривних зразків із спеченого титану BT1-0, виконаного зварюванням тертям перемішуванням

Таким чином, аналіз результатів металографічних досліджень дозволив встановити, що в зоні термомеханічного впливу середній розмір пор був менше у 2...4 рази, ніж в основному металі. У зварному шві залишкові пори мали у 50...60 разів менші розміри, ніж в основному металі, а їх об'ємна частка

зменшилася в 5...8 разів. Це свідчить про часткове або повне «заліковування» пор під дією інтенсивної деформації і температури.

Мікрорентгеноспектральний якісний аналіз дозволив встановити, що характер розподілу основних домішкових елементів (азоту і кисню) для стикового зварювання оплавленням і конвекційного зварювання тертям був практично однаковим у зварному стику і основному металі. За даними РСМА при зварюванні тертям перемішуванням вміст кисню та азоту в зварному шві і зонах термомеханічного впливу був в 1,2...1,3 рази вищим у порівнянні з попередніми видами зварювання і нерівномірним – з явними концентраційними сплесками, що свідчить про існування включень (оксидів і нітридів).

Встановлено, що величини границі міцності зони шва при стиковому і конвекційному способах зварювання в середньому на 18 % і 25 % відповідно, перевищували границю міцності вихідних спечених заготовок. Це можна пояснити формуванням в зоні стику більш щільного металу, його дисперсною мікроструктурою з поодинокими порами розміром 1...3 мкм. При зварюванні тертям перемішуванням міцність зварного з'єднання виявилася майже в 2 рази нижчою в порівнянні з міцністю двох попередніх способів зварювання внаслідок часткового насичення зварного шва оксидами, які були втілені інструментом з поверхні зразка.

Результати досліджень показали, що найбільш сприятливий вплив на структуру, механічні властивості і розподіл домішкових елементів забезпечило конвекційне зварювання тертям. При цьому способі зварювання були найменші розміри зон зварного з'єднання: ширина шву в 2 рази менше, ніж при стиковому оплавленням і в 20 разів менше, ніж при терті перемішуванням; ширина зони термомеханічного впливу – в 4...7 і 2 рази менше, відповідно. Також він забезпечував зменшення розміру та кількості пор, подрібнення структурних складових і підвищення границі міцності до 25 % в порівнянні з вихідним матеріалом і до 12 % в порівнянні із стиковим зварюванням оплавленням, що обумовлено наявністю радіальної складової навантаження, котра дозволила підсилити подрібнення структурних складових. Тому подальші дослідження

експлуатаційних характеристик і промислові випробування проводилися на зразках, що були отримані з використанням конвекційного зварювання тертям.

Наступний етап полягав в дослідженні корозійних властивостей зварних з'єднань, які отримано цим видом зварювання. Корозійні дослідження зварних з'єднань спеченого титану та їх взаємозв'язок з структурним станом матеріалу проводили з метою оцінки перспектив використання методу конвекційного зварювання тертям для виготовлення напівфабрикатів і виробів зі спеченого титану для експлуатації в агресивних середовищах.

4.2 Вплив структури на корозійну стійкість зварних з'єднань титану, отриманих зварюванням тертям

Заготовки отримували у вигляді порожнистих циліндрів (див. рис. 2.2 в), зварювали методом конвекційного зварювання тертям (рис. 4.19) і проточували до розмірів, що моделюють корпуси запірної арматури.

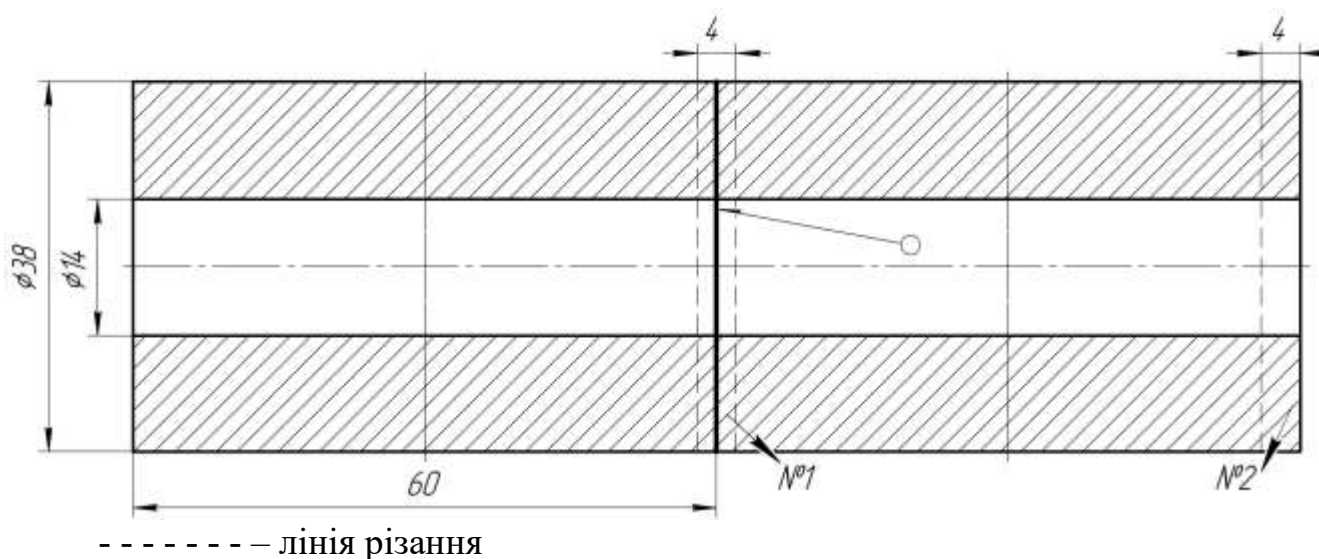
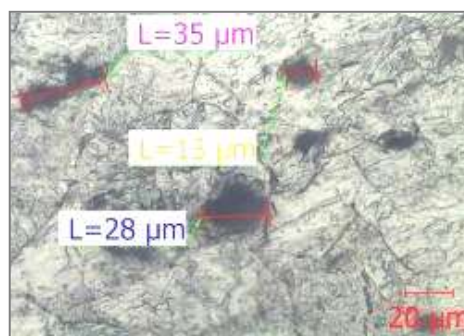


Рисунок 4.19 - Заготовки порошкового сплаву ВТ1-0 після спікання та конвекційного зварювання тертям

Для визначення рівномірності розподілу складу, структури і властивостей зразка із спеченого титанового порошку, отриманого конвекційним зварюванням тертям, проводили: металографічні дослідження (рис. 4.20, 4.21); виміри твердості, мікротвердості і рентгеноспектральний мікроаналіз розподілу хімічних елементів.

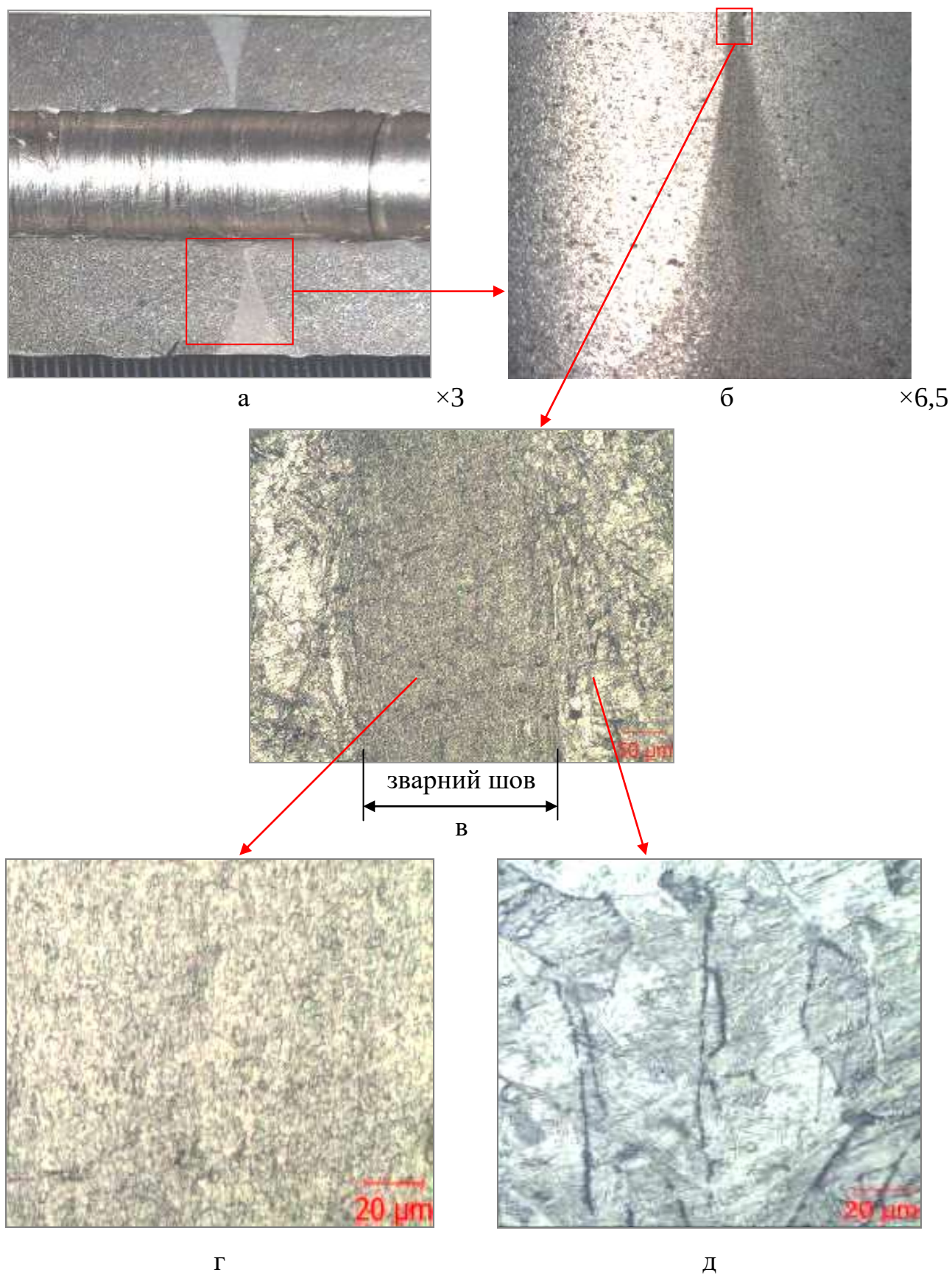


L – максимальний лінійний розмір пори $d_{\text{пор. max}}$

Рисунок 4.20 – Мікроструктура основного металу спечених заготовок

Мікроструктура основного металу складається із крупних пластин α -фази шириною близько 25 мкм, однотипна з мікроструктурою литого титану. Мікропори, розташовувалися в основному металі зразка, переважно мали неправильну форму, розміри їх складали 13...35 мкм (див. рис. 4.20), об'ємна частка пор в даних зразках становила 4...7 %.

При металографічному дослідженні поперечного шліфа (див. рис. 4.21) встановлено, що зварне з'єднання в перерізі має конусоподібну форму, ширина його сягає 1...8 мм. Мікроструктура зварного з'єднання, на відміну від основного металу, характеризувалася дрібнозернистою будовою, розміри зерен α -фази знаходилися в межах 1,0...2,5 мкм. Розмір виявлених пор не перевищував 5 мкм, їх об'ємна частка складала до 1 %. Структура зони термомеханічного впливу зварних заготовок мала тонкопластинчасту структуру і складалася з радіально орієнтованих пластин α -фази шириною до 3 мкм і довжиною до 70 мкм, по межах яких розташовувалися пори розмірами до 15 мкм, об'ємна частка пор складала 2...3 %.



в, г – шов; д – зона термомеханічного впливу

Рисунок 4.21 – Макро- (а, б) і мікроструктура (в, г, д) зварного з'єднання зразків із спеченого титану BT1-0, виконаного конвекційним зварюванням тертям

Значна кількість пор була видовженою, шириною до 1 мкм і мала радіальне орієнтування (паралельно шву), що свідчило про «заліковування» пор під дією температури і осьової сили при осадці аналогічно зразкам малого діаметру (див. п. 4.2.2). В результаті вимірів твердості методом Бринелля встановлено, що значення мають значний розкид: від 155 НВ до 270 НВ, в той же час, значення мікротвердості ($HV_{0,05}$, крок вимірів 0,5 мм) знаходилися приблизно на одному рівні $HV_{0,05} = 1900 \dots 2300$ МПа. Причому максимальні їх значення твердості, отримані за обома методами, фіксувалися в зоні зварного шва. Такий розкид значень твердості по Бринеллю обумовлений, наявністю пористості, що знижує твердість.

При вимірюванні мікротвердості різниця в значеннях несуттєва, оскільки виміри виконано в ділянках без мікропор. Також це опосередковано свідчить про відсутність у зварному з'єднанні включень (оксидів, нітридів). Більш високі значення твердості і мікротвердості в зоні зварного шва, крім відсутності пор, можна пояснити одноріднішою дрібнозернистою будовою в порівнянні з крупнопластинчатою структурою основного металу.

Таким чином, пори і структурні складові спеченого титану, підданого зварюванню тертям, впливають на розподіл значень твердості. Рентгеноспектральний мікроаналіз показав, що на межі мікропор насичення киснем не спостерігалось.

Таким чином показано, що методом конвекційного зварювання тертям без додаткового захисту можливо отримувати заготовки у вигляді порожнистих циліндрів з розмірами, що ідентичні деталям (корпус запорної арматури), які використовують у металургійній, хімічній промисловості.

Дослідження корозії проводились в зварному шві та зоні термомеханічного впливу товщиною 1,5...2,5 мм (див. рис. 4.19). Відомо, що пресовані заготовки мають змінну поруватість по висоті, тому для гарантування однакової вихідної щільності матеріалу контрольні зразки основного металу вирізали з протилежної місту зварювання сторони. Поверхню зразків після електроерозійного різання шліфували і полірували.

Оцінку стійкості металу до корозії проводили за результатами випробувань методом електрохімії. На основі потенціодинамічних характеристик катодних і анодних процесів прогнозували інертність або схильність до локальної корозії.

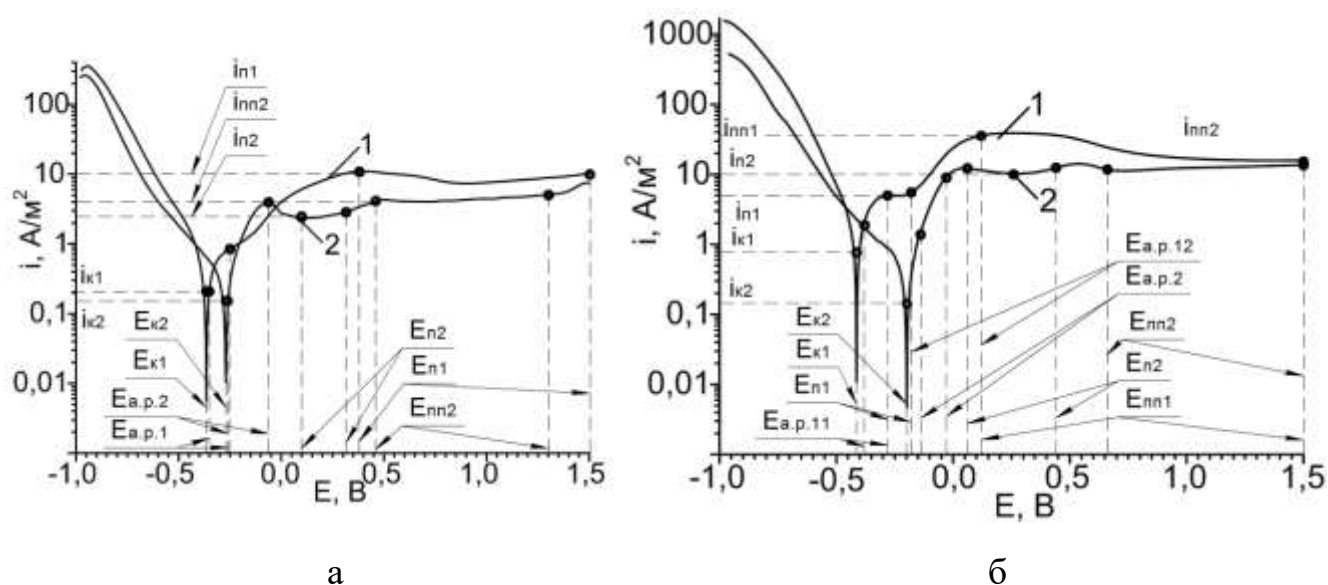
Корозія та анодне розчинення титанових сплавів визначаються природою електроліту, його аніонним складом та температурою [216]. Традиційно в якості електролітичних середовищ при корозійних дослідженнях титану та його з'єднань використовуються розчини HCl , H_2SO_4 . Титанові сплави є нестійкими в розчинах мінеральних кислот високих концентрацій [217].

Швидкість корозії розраховували гравіметричним методом за зміною маси зразків (ГОСТ 9.908-85) після експозиції 240 часів в агресивному середовищі, зважуючи зразки вагою Voyager фірми "ОНАУС" до і після витримки в корозійному середовищі. корозійну опірність оцінювали, витримуючи у 20 % розчині хлоридної кислоти та 40 % сульфатної, без перемішування і вільного доступу повітря, за кімнатної температури в середовищах з нормальним вмістом кисню.

Для визначення швидкості корозії гравіметричним методом попередньо вимірювали розміри зразків для оцінки його площі поверхні. Робочу поверхню зразків знежирювали та просушували. Після зважування зразки до подальших маніпуляцій зберігали в ексикаторі. Підготовлені зразки встановлювали на підставках у склянки, котрі заповнювали розчинами кислот відповідно до програми випробувань. Відлік часу розпочинали з моменту занурення зразка у розчин.

Вивчали вплив структури зварних з'єднань на кінетику анодного розчинення і кінетичні закономірності хімічного розчинення в агресивних середовищах типових для металургійної та хімічної галузей. На рисунку 4.22 представлено потенціодинамічні поляризаційні криві, зняті зі зварного з'єднання титану у 20 % водному розчині хлоридної і 40 % водному розчині сульфатної кислот. Оскільки хімічний склад усіх зразків однаковий, то характер поляризаційних кривих і електрохімічних процесів, спричинених взаємодією титану з агресивним середовищем, подібний. Усі досліджувані зразки кородують

в умовах пасивації.



а – 20 % хлоридна кислота; б – 40 % сульфатна кислота;

1 – основний метал; 2 – шов та колошовна зона

$E_{a.p.}$, E_k , E_n , E_{nn} – потенціал анодного розчинення, корозії, пасивації та перепасивації відповідно, В;

i_k , i_n , i_{nn} – густина струму корозії, пасивації та перепасивації відповідно, A/m^2

Рисунок 4.22 – Поляризаційні криві зварного з'єднання зразків із спеченого титану BT1-0, виконаного конвекційним зварюванням тертям

На анодній гілці потенціодинамічної кривої, знятої з основного металу (рис. 4.22, а, крива 1), в діапазоні потенціалів $E_{a.p.1} = - (0,25...0,35)$ В спостерігалось активне анодне розчинення. За потенціалів $0,38...1,5$ В фіксували пасивну ділянку, обумовлену, ймовірно, утворенням нестехіометричних оксидів титану, які формувалися на поверхні та сповільнювали процес [218]. Густина струму пасивації становила $i_{n1} = 10 A/m^2$, струму корозії $i_{k1} = 0,207 A/m^2$. Стаціонарний потенціал корозії основного металу титану, одержаного методом порошкової металургії, у 20 % розчині хлоридної кислоти становив $E_{k1} = - 0,365$ В, а зварного шву – зсувався в позитивний бік.

Потенціал корозії зварного шву ушляхетнювався $E_{k2} > E_{k1}$ (- 0,270 В проти - 0,365 В), а струм корозії знижувався $i_{k2} < i_{k1}$ (0,162 А/м² проти 0,207 А/м²). Анодне розчинення зразка відбувалося за нижчих струмів ($E_{a.p.2} = - (0,061...0,25)$ В). За потенціалів $E_{п2} = 0,10...0,32$ В спостерігалася коротка пасивна ділянка, густина струму пасивації становила $i_{п2} = 2,5$ А/м². Другу пасивну область, зумовлену, вочевидь, формуванням на поверхні продуктів корозії, які сповільнювали процес [49], фіксували в діапазоні потенціалів 0,46...1,36 В. Густина струму перепасивації становила $i_{пп2} = 4$ А/м². Перепасивація поверхні була обумовлена формуванням оксихлориду титану TiO_xCl_2 , доокислення якого до діоксиду титану, обумовило існування пасивної ділянки [218].

На анодній гілці потенціодинамічної кривої, знятої з основного металу (рис. 4.22, б, крива 1) у 40 % водному розчині сульфатної кислоти, були явно виражені дві активні ділянки, що обумовлені, ймовірно, процесами розчинення поверхні (перша ділянка $E_{a.p.11} = - (0,39...0,28)$ В) та окислення із утворенням стійких оксидних фаз (друга ділянка $E_{a.p.12} = - 0,180...0,120$ В). За потенціалів $E_{п1} = - (0,280...0,180)$ В спостерігалася коротка пасивна ділянка, струм пасивації становив $i_{п1} = 5$ А/м². Відновлення поверхневої плівки за рахунок утворення продуктів корозії за потенціалів $E_{пп1} = 0,12...1,5$ В пасивував поверхню, струм перепасивації становив $i_{пп1} = 35,9$ А/м². Струм корозії $i_{k1} = 0,77$ А/м², потенціал корозії $E_{k1} = - 0,416$ В.

Як і в розчині хлоридної кислоти, у розчині сульфатної кислоти потенціал корозії зразка № 2 ушляхетнювався $E_{k2} > E_{k1}$ (-0,196 В проти -0,416 В), а струм корозії знижувався $i_{k2} < i_{k1}$ (0,151 А/м² проти 0,77 А/м²). На анодній гілці зразка зварного шву (див. рис. 4.22, б, крива 2) у 40 % розчині сульфатної кислоти ($E_{a.p.2} = - (0,03...0,14)$ В) за потенціалів $E_{п2} = 0,06...0,44$ В спостерігалася перша пасивна ділянка (густина струму пасивації становила $i_{п2} = 10$ А/м²), а в діапазоні потенціалів $E_{пп2} = 0,669...1,5$ В фіксували другу пасивну ділянку ($i_{пп2} = 20$ А/м²). Значення потенціалу перепасивації було зміщене в сторону більших значень (0,669 В проти 0,120 В), тобто процес анодного розчинення пришвидшувався.

Форма потенціодинамічних кривих в обох розчинах для обох зразків

свідчила об ідентичності процесів на електроді в катодній і анодній області потенціалів. На потенціодинамічних катодних кривих прослідковувалася область тафелевих прямих, нахил яких свідчить про різну швидкість проходження реакцій в ЗТМВ та в основному металі. Анодна поляризація всіх зразків проходила по активно-пасивному механізму розчинення. Ділянки анодних поляризаційних кривих в області активного розчинення були виражені досить сильно. З аналізу поляризаційних кривих випливало, що у випадку позитивного потенціалу густина анодного струму залежить від нього незначно. Умова (1.2) для зварного з'єднання, отриманого зварюванням тертям, виконувалася для обох кислот. Аналіз результатів показав, що потенціали всіх зразків з плином часу зміщувалися в бік додатних значень. Це указує, що зразки спеченого порошкового титану і його зварного з'єднання кородували в умовах пасивації. Анодна поляризація проходила за характерним для матеріалу активно-пасивним механізмом.

При цьому густина струму в пасивній області незначно (у декілька разів) зменшувалася, що свідчило про деяке підвищення корозійної стійкості. Дослідження корозійної стійкості показало, що не зважаючи на від'ємну величину стаціонарного потенціалу (E_K), анодні поляризаційні криві отримані для цих зразків, характеризувалися великою протяжністю пасивної області. Характер анодних поляризаційних кривих зварних зразків свідчив про відсутність щільової корозії в області зони зварювання.

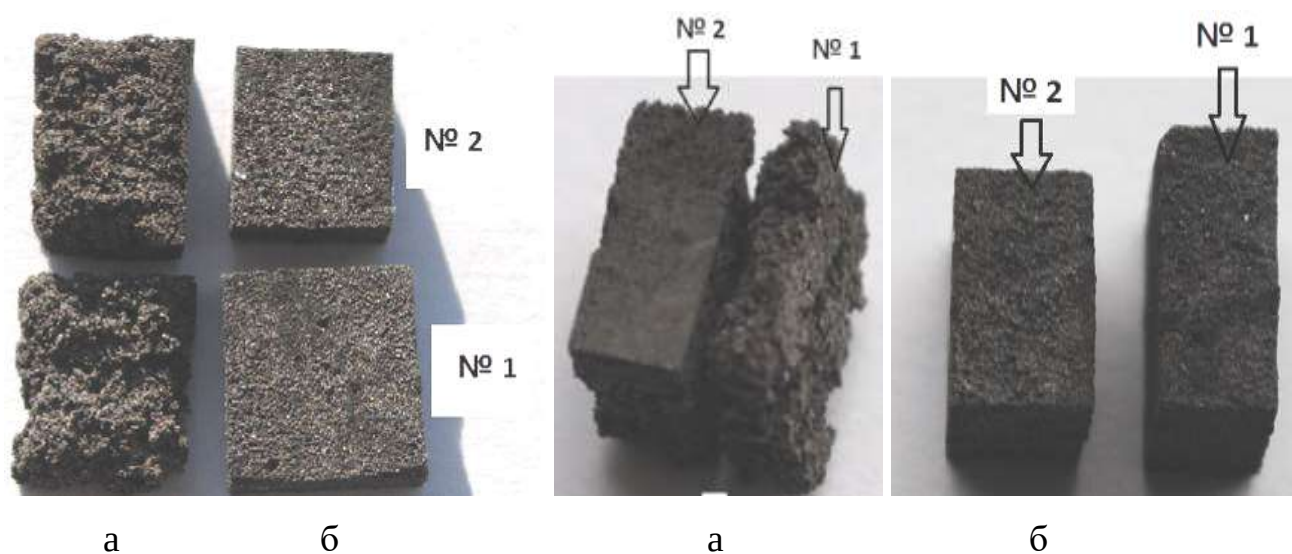
Таким чином показано, що стійкість до корозії металу зварного шва та колошовної зони вище порівняно з основним металом у 20 % водному розчині хлоридної і 40 % водному розчині сульфатної кислот. В обох досліджуваних агресивних середовищах процеси пасивації та перепасивації зразків зварного шва та колошовної зони проходили за тими ж механізмами, що і в основному металі. Спостережуване ушляхетнення потенціалу корозії зразків зварного шва та колошовної зони, а також нижчі густини струму корозії і струмів анодного розчинення, очевидно, були пов'язані з формуванням більш однорідної структури, суттєвим підвищенням густини компактованого матеріалу (зменшенням розмірів та кількості пор) та відсутністю сегрегації домішок, що спостерігали

металографічно.

Результати випробувань по визначенню опору корозії ваговим методом (табл. 4.3) та візуальні спостереження кородованих зразків (рис. 4.23) у водних розчинах хлоридної та сульфатної кислот за експозиції 240 год показали кореляцію з електрохімічними дослідженнями. Швидкість корозії була прямо пропорційна густині анодного струму для кожної з обраних кислот.

Таблиця 4.3 – Корозійні характеристики зразків із спеченого титану BT1-0, виконаного конвекційним зварюванням тертям у розчинах кислот

Середовище	K _{кор} , г/(м ² ·год)	
	основний метал	шов та колошовна зона
20 % розчин хлоридної кислоти (HCl)	12,138	7,952
40 % розчин сульфатної кислоти (H ₂ SO ₄)	0,967	0,921



а – 20 % хлоридна кислота; б – 40 % сульфатна кислота

Рисунок 4.23 – Зразки основного металу 1 і зони шву та термомеханічного впливу 2 зразків із спеченого титану BT1-0, виконаного конвекційним зварюванням тертям після експозиції 240 год у водних розчинах кислот

Було встановлено, що швидкість корозії у 20 % водному розчині хлоридної

кислоти зон шву та термомеханічного впливу у 1,5 рази менша, ніж основного металу. У 40 % водному розчині сульфатної кислоти швидкості корозії як основного металу, так і зони шва та колошовної зони сумірні, проте з тенденцією до зменшення швидкості корозії зразка зони шву та термомеханічного впливу. Отримані закономірності, очевидно, пов'язані зі зменшенням розмірів пор і їх кількості в зоні термомеханічного впливу, бо саме пори сприяють проникненню агресивного середовища вглиб металу, через що збільшується фактична площа їх взаємного контактування.

Швидкість корозії зони основного металу у 12,6 рази нижча у 40 % водному розчині сульфатної кислоти, ніж у 20 % водному розчині хлоридної кислоти, що пов'язано з більшою агресивністю останнього середовища. Для зразка зони шву та термомеханічного впливу цей показник був нижчий і становив 8,6 разів.

Порівняння результатів випробувань корозії ваговим методом основного металу спеченого титану з раніше отриманими результатами на зразках розмірами 10 мм × 10 мм × 55 мм [50] показало наступне. Швидкості корозії у 40 % водному розчині сульфатної кислоти співпадають. Швидкість корозії основного металу у 20 % водному розчині хлоридної кислоти в рази більше. Зменшення абсолютних значень спротиву корозійному середовищу, очевидно, обумовлено масштабним фактором (площа поперечного перерізу та маса різняться на порядок). Це потребує подальших досліджень.

В результаті електрохімічних і гравіметричних досліджень корозійної стійкості зварних з'єднань спеченого технічного титану ВТ1-0 встановлено закономірності впливу структури на корозійні властивості за кімнатної температури у водних розчинах неорганічних кислот.

Корозійні характеристики у водних розчинах хлоридної та сульфатної кислот корелюють зі структурними характеристиками різних зон зварного з'єднання спеченого титану ВТ1-0. Корозійна дія 20 % водного розчину хлоридної кислоти на досліджувані зразки суттєво перевищує дію 40 % водного розчину сульфатної кислоти.

Антикорозійні характеристики металу зони термомеханічного впливу

зварного з'єднання, отриманого конвекційним зварюванням тертям, спеченого титану BT1-0, вищі порівняно з основним металом завдяки формуванню одноріднішої структури, її подрібненню, суттєвим підвищенням питомої щільності компактованого матеріалу (зменшенням розмірів та кількості пор) та відсутністю сегрегації домішок. З великою вірогідністю можна стверджувати і про ще вищі антикорозійні характеристики металу зони зварного шва.

З огляду на те, що конвекційне зварювання тертям задовольняє вимоги рівностійкості зон зварного з'єднання (1.2), воно може використовуватися для отримання виробів зі спеченого технічного титану, що експлуатуються в хімічноактивних середовищах.

Таким чином показано, що стійкість до корозії металу зон шву та колошовної зони вища порівняно з основним металом, це дозволяє використання методу конвекційного зварювання тертям для спечених титанових сплавів, для в хімічноактивних середовищ. На основі отриманих результатів можна зробити висновки про перспективність використання методів зварювання тиском при виготовленні виробів зі спеченого титану для металургійної, хімічної промисловості.

Результати цього розділу наведено в наступних публікаціях здобувача [207, 219, 220, 221, 222].

4.3 Висновки до розділу 4

1. Виконано порівняльний аналіз впливу трьох видів зварювання: стикового оплавленням, конвекційним тертям і тертям перемішуванням на якість зварного з'єднання спечених порошкових заготовок.

2. Встановлено закономірності розподілу основних домішкових елементів (азоту і кисню) у зварному шві і показано, що без додаткового захисту не відбувається газонасичення при стиковому зварюванні оплавленням і

конвекційному тертям. Зварювання тертям перемішуванням без попереднього очищення поверхні спеченого титану призводить до появи тріщин в зварному шві та його насиченню включеннями з поверхні заготовки і газами з навколишньої атмосфери.

3. Металографічні дослідження дозволили встановити, що:

- при стиковому зварюванні оплавленням мікроструктура основного металу, що складалася із зерен α -фази розмірами 40...70 мкм, трансформувалася в зварному шві і ЗТМВ в пластинчасту будову α -фази. Залишкові пори в зварному шві практично були відсутні, в ЗТМВ їх розмір знизився до 2 мкм;

- при конвекційному зварюванні тертям ширина зварного шву становила 0,08...0,25 мм, ширина ЗТМВ – 2,0...2,5 мм. У зварному шві майже були відсутні пори, розмір залишкових пор не перевищував 3 мкм, в ЗТМВ – до 5 мкм, ширина частково захопнутих пор становила не більше 3 мкм;

- при зварюванні тертям перемішуванням ширина зварного шву становила близько 20 мм, що відповідало діаметру зварювального інструменту. У верхній частині шву спостерігалися поодинокі тріщини, спрямовані нормально до поверхні зварних заготовок; голчасті пластини, орієнтовані в напрямку обертання інструменту шириною до 3 мкм і довжиною до 10 мкм, поруч розташовувалися пори розмірами до 3 мкм $\times$ 10 мкм; округлі включення білого кольору і пори округлої і серповидної форми розміром до 20 мкм.

4. Встановлено вплив структури на механічні властивості зварних з'єднань спечених матеріалів. Показано, що рівень механічних властивостей зварних з'єднань спеченого титану порівняний з основним металом. При стиковому зварюванні оплавленням і конвекційному тертям міцність в місці стику ($\sigma_B = 409...460$ МПа) перевищує міцність основного металу, при зварюванні тертям перемішуванням, навпаки, міцність зварного шву менше міцності основного металу ($\sigma_B = 222...240$ МПа проти $\sigma_B = 345...400$ МПа).

5. Виконано порівняльний аналіз структури, механічних властивостей і розподілу домішкових елементів в металі зварних швів, отриманих при трьох видах зварювання: стиковим оплавленням, тертям конвекційним і тертям

перемішуванням. Встановлено, що найбільш сприятливий вплив на структуру, механічні властивості і розподіл домішкових елементів надає конвекційне зварювання тертям. Цей вид зварювання забезпечує «заліковування» пор і подрібнення структурних складових, зниження кількості пор на 17 % і підвищення межі міцності на 25 % в порівнянні з вихідним матеріалом.

6. В цілому результати досліджень дозволили встановити, що конвекційне зварювання тертям є найбільш перспективним при виробництві виробів з титану, що працюють в умовах незначних механічних навантажень і агресивних середовищ.

7. Проведено дослідження впливу структури зварних з'єднань, отриманих конвекційним зварюванням тертям, на електрохімічну і загальну корозійну стійкість. Корозійні характеристики у водних розчинах хлоридної та сульфатної кислот корелюють зі структурними характеристиками різних зон зварного з'єднання спеченого титану. Корозійна дія 20 % водного розчину хлоридної кислоти на досліджувані зразки суттєво перевищує дію 40 % водного розчину сульфатної кислоти. Антикорозійні характеристики металу зони термомеханічного впливу зварного з'єднання, отриманого конвекційним зварюванням тертям, вищі порівняно з основним металом завдяки формуванню більш однорідної структури, суттєвим підвищенням густини компактованого матеріалу (зменшенням розмірів та кількості пор) та відсутністю сегрегації домішок. З великою вірогідністю можна стверджувати і про ще вищі антикорозійні характеристики металу зони зварного шву. З огляду на те, що конвекційне зварювання тертям задовольняє вимоги рівностійкості зон зварного з'єднання, воно може використовуватися для отримання виробів зі спеченого технічного титану, які будуть працювати в агресивних середовищах.

РОЗДІЛ 5

ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ І ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

5.1 Мета і задачі промислових випробувань

Оскільки титан має високу корозійну стійкість у річковій і морській воді, органічних і неорганічних кислотах [85], вироби з титану знаходять застосування в хімічній, металургійній та інших галузях промисловості, виробництво в яких пов'язане з агресивними середовищами. У цих галузях з титану і його сплавів виготовляють насоси, запорну арматуру, трубопроводи та інші вироби, застосовуючи методи лиття та ОМТ. У зв'язку з тим, що плавка титану здійснюється у вакуумі, а процеси ОМТ пов'язані зі значними втратами металу при механічній обробці, для виробництва зазначених вище виробів перспективними є методи порошкової металургії (див. п. 1.1). Об'єктами випробувань були дискові й кульові крани, деталі для перекачувальних насосів, напівфабрикати у вигляді прутків з порошкового титану.

В процесі промислових випробувань необхідно було виконати наступні задачі:

- оцінити технічну та економічну ефективність застосування виробів, які одержували за запропонованою в роботі комплексною технологією: «порошкова металургія – зварювання»;
- порівняти вартість виробів, які одержували за запропонованою технологією, з вартістю виробів, одержуваних стандартними методами;
- за результатами випробувань видати рекомендації промисловим підприємствам.

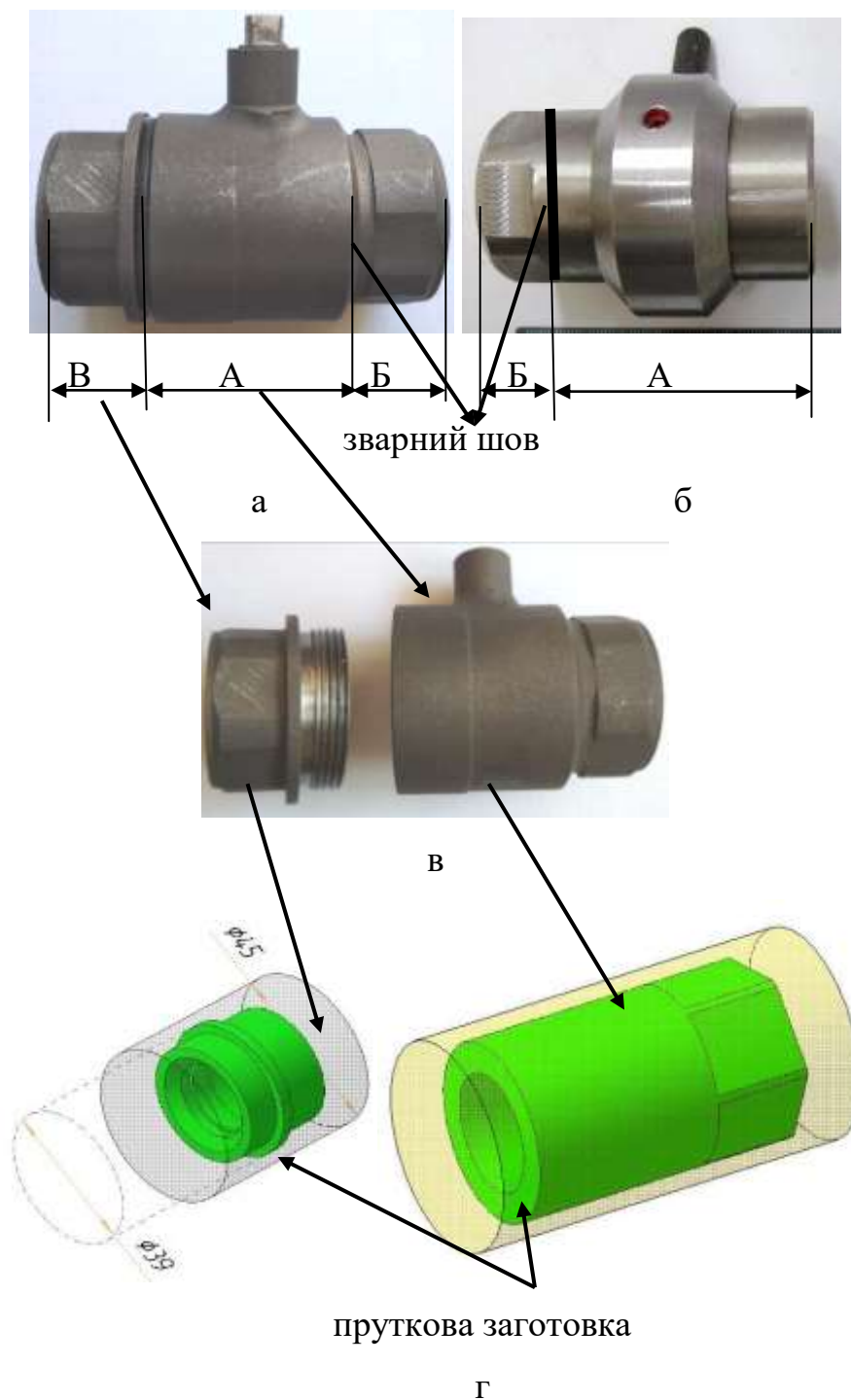
У лабораторних умовах в якості шихти при виготовленні напівфабрикатів застосовували також гідрид титану губчастого, легований киснем [223]. Однак його застосування при отриманні виробів в промислових умовах, по-перше, здорожує процес і, по-друге, практично неможливе в реалізації на наявному в

Україні обладнанні. Тому промислова апробація реалізовувалася тільки на порошках титану.

5.2 Виготовлення корпусів кранів методами порошкової металургії і зварювання

На ТОВ «Авіа-Січ» було здійснено заміну литих і отриманих методом ОМТ виробів, які застосовуються для роботи в агресивних середовищах, на спечені з порошків титану ПТ (ТУ У 14-10-026-98) фракцією $-0,45+0,28$ мм. На цьому підприємстві виробляли корпуси кранів в якості запорних пристроїв на технологічних та магістральних лініях, що транспортують агресивні середовища. Аналіз умов експлуатації запорних кранів показав, що вони працюють в умовах, які поєднують тертя, агресивне середовище і температуру до 100°C . Корпус крана, виконаний з деформованого сплаву ВТ1-0 мав високу вартість через низький коефіцієнт використання матеріалу, в зв'язку з тим, що виробництво деталей включало дворазовий вакуумний переплав титану губчатого з подальшим отриманням із злитка методом ОМТ прутків стандартного типорозміру. У деяких випадках для виробництва використовували технологію лиття. При цьому, як правило, проводилися імпорتنі закупівлі виробів, деталей і заготовок, у зв'язку з тим що, як показав аналіз сучасного ринку титану, лиття і деформаційна обробка титанових сплавів в Україні практично відсутні (див. розділ 1).

За новою технологією для запорного пристрою методом порошкової металургії отримували трубчасті заготовки А, Б і В (рис. 5.1, а). Частини Б і В з'єднувалися між собою методом аргонодугового зварювання неплавким електродом. Частина А приєднувалася до частини Б методом конвекційного зварювання тертям на наступних режимах: час зварювання 5 с; тиск при нагріванні і осадженні 20 МПа, частота обертання $23,83\text{ c}^{-1}$. Аналогічним чином проводилося складання дискових кранів (рис. 5.1, б).



а – кульовий кран; б – дисковий кран; в – напівфабрикати для їх виготовлення, отриманні методом порошкової металургії; г – напівфабрикати в об'ємі пруткової заготовки

Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд запорних кранів

Аналіз виробництва кранів із сортового прокату шляхом механічної обробки (рис. 5.1, г) і методом лиття показав їх високу матеріаломісткість і

низький КВМ, відповідно 0,63 і 0,42 в порівнянні з 0,84 за запропонованою технологією. Згідно з висновком комісії, яка розглядала результати промислових випробувань на ТОВ «Авіа-Січ»:

- заготовки мали задовільну оброблюваність різанням на токарних і фрезерних верстатах;
- випробування при тиску 2,4 МПа показали повну герметичність кранів;
- пруткові напівфабрикати, які отримано методами порошкової металургії і зварювання, рекомендовані для заміни імпортних пруткових напівфабрикатів і при виготовленні корпусів кранів;
- економічний ефект від впровадження даної роботи склав в 2017 р. 173 тис. грн (додаток А).

Крани пройшли апробацію також на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» (табл. 5.1). В ході проведення дослідно-промислових випробувань на газоочисних спорудах цеху №7 в агресивному середовищі встановлено, що кран (рис. 5.2) працював в штатному режимі протягом 1008 годин. Зварний корпус мав прояви корозії на рівні сплаву ВТ1-0 (додаток Б).



Рисунок 5.2 – Зовнішній вид кульового крану після випробування на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат»

Таблиця 5.1 – Техніко-економічні показники впровадження матеріалів дисертації

Підприємство	Об'єкт промислових дослідів і впровадження	Результати дослідів і впровадження	Очікуваний річний економічний ефект від впровадження, грн
ТОВ «Авіа-Січ»	Крани дискові DN15 і DN20, пруткові заготовки з порошків титану	Зниження імпорتنих закупок у результаті впровадження нової технології	173000
ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат»	Крани кульові DN20	Зниження вартості з 1180 грн до 740 грн у результаті заміни сталі 10X18H9T на титан	44000
ДП «Кремній-полімер»	Втулка валу мулового насоса 28/2	Втулка після 1000 год не мала слідів корозії	Технологія рекомендована до впровадження
ДП «ДНДП Інститут титану»	Напівфабрикати з порошків титану	Корозійна стійкість порошкових виробів в HNO_3 , H_2SO_4 , HCl при випробуваннях протягом 170 год не нижче, ніж деформованого сплаву BT1-0	Технологія рекомендована до впровадження

5.3 Виготовлення деталей насосів та заготовок

Для мулових насосів марки 28/2 Запорізького державного підприємства «Кремнійполімер» розроблено технологію виготовлення втулок зовнішнім діаметром 53 мм, внутрішнім діаметром 32 мм і висотою 37 мм методом порошкової металургії. Раніше втулки для цих насосів виготовлялися з деформованого титану BT1-0. Їх основний недолік полягав у більш високій вартості у порівнянні з порошковим аналогом. Для промислових випробувань втулка була впресована в титанове кільце насоса марки 28/2 і зварена з ним. Насос змонтований на ділянці біохімічного очищення. Дослідження проводили з 08.01.2015 р. по 30.03.2015 р.

Після експлуатації деталі в робочому лужно-кислотному середовищі протягом 1000 годин, насос був демонтований і розібраний, а стан деталі піддано оцінюванню. Було встановлено наступне (додаток В):

- втулка не мала слідів корозії і зносу вище нормованих показників для раніш використовуваної деталі з деформованого титанового сплаву BT1-0;
- зварювання досліджуваної втулки проводилося без ускладнень процесу, а зварне з'єднання не мало видимих відмінностей від шву деформованого титану BT1-0, який використовувався раніше;
- виготовлення втулки вала мулового насосу марки 28/2 за досвідною технологією, розробленою в НДЦ "Титан Запоріжжя" ЗНТУ, забезпечило КВМ до 93 %;
- на підставі проведених оціночних робіт зроблено висновок про доцільність використання досвідного методу виготовлення і монтажу деталей.

У зв'язку з дефіцитом і високою вартістю пруткових матеріалів із титану і його сплавів була розроблена технологія отримання пруткових заготовок за технологією «порошкова металургія – зварювання тертям». Зварювання застосовувалося за необхідністю отримання довгомірних заготовок у зв'язку з тим, що високі пресовані деталі мають змінну щільність за висотою внаслідок

тертя порошку о стінки прес-форми. В якості устаткування використовувався гідравлічний прес-напівавтомат ДБ2432А з ходом повзуна 630 мм і максимальною відстанню між столом і повзуном 1000 мм. Було поставлено завдання розробити прес-форму для такого обладнання з урахуванням фракційного складу порошку і усадки пресованого виробу, які було визначено на підставі результатів досліджень заготовок (див. розділ 3). Було проведено конструкторсько-технологічний розрахунок, розрахунок міцності, геометрії і кінематичний розрахунок матриці. На рисунку 5.3 представлено ескіз розробленої прес-форми для отримання напівфабрикатів.

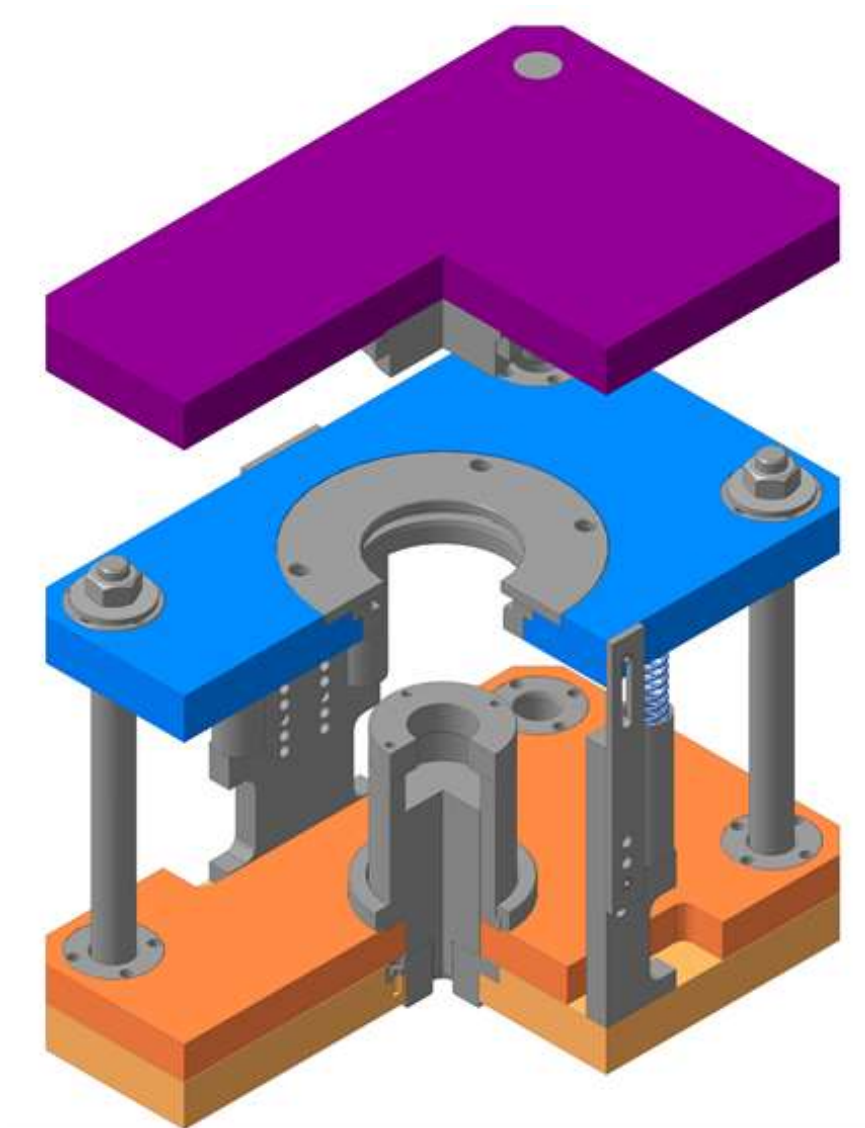


Рисунок 5.3 – Ескіз прес-форми для отримання напівфабрикатів зовнішнім діаметром 40 мм і висотою до 60 мм

Виробництво порошкових заготовок для виготовлення запорних кранів, довгомірних і невеликих деталей є економічно доцільним (рис. 5.4) у зв'язку з дефіцитом та високою вартістю матеріалів з титану і його сплавів, а також з більш високою вартістю виготовлення цих виробів методами лиття та механічної обробки з деформованих напівфабрикатів (додаток Г). Довгомірні напівфабрикати, які отримано методами порошкової металургії та зварювання, рекомендовані для заміни імпорتنих пруткових напівфабрикатів при виготовленні деталей невеликих розмірів.

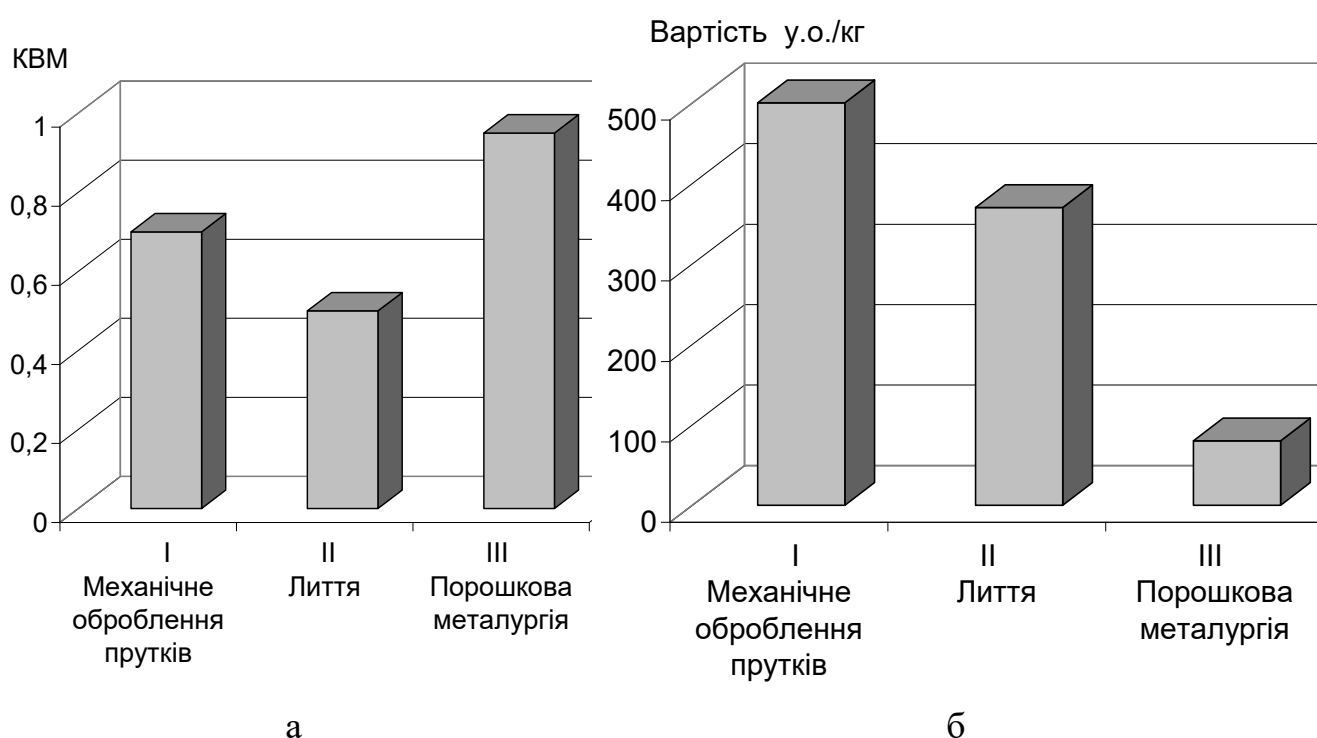


Рисунок 5.4 – КВМ (а) і вартість виробництва 1 кг запорної арматури з титану (б) при виробництві за існуючими і розробленою ресурсозберігаючою технологіями

Випробування в ДП «ДНДП Інститут титану» показали, що корозійна стійкість матеріалу, який отримано за розробленою технологією, майже не поступається раніше застосованому деформованому сплаву BT1-0. Рекомендовано використання та впровадження розробленої технології для виготовлення деталей і довгомірних напівфабрикатів.

Згідно з даними, наведеними в таблиці 5.1, швидкість корозії зразків з дослідних сплавів не нижче, ніж для сплавів BT1-0 в литому або деформованому стані відповідно, що підтверджено актами промислової апробації (додаток А, В, Г). Крім того, заміна виробів з нержавіючої сталі на аналогічні з порошкового титану дозволяє знизити їх вартість до 40 % (додаток Б).

Таким чином, результати порівняльних випробувань в промислових умовах дають підставу припустити, що застосування порошкового матеріалу замість серійного титанового сплаву BT1-0 дозволить знизити металоємність і підвищить економічність виробів, що працюють в агресивних середовищах.

Згідно відгуку АТ «Мотор Січ» (додаток Д), яке використовує у виробничому циклі титанові сплави в якості конструкційних матеріалів, розроблені порошкові матеріали можуть знайти застосування в конструкціях газотурбінних двигунів взамін зарубіжних аналогів матеріалів.

Впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальному процесі на кафедрі обладнання і технології зварювального виробництва ЗНТУ призвело до підвищення якості підготовки студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» (додаток Е).

Результати цього розділу наведено в наступних публікаціях здобувача [170, 205, 220, 221, 222, 224].

5.4 Висновки до розділу 5

1. Проведено дослідно-промислову перевірку результатів дисертаційної роботи в ДП «ДНДП Інститут титану» (м. Запоріжжя) та на трьох промислових підприємствах.

2. Результати перевірки показали техніко-економічну доцільність використання матеріалів дисертаційної роботи.

3. Згідно з отриманими матеріалами проведених досліджень і промислових

випробувань запропонована в роботі технологія дозволяє:

- розширити використання порошкового титану виробництва ДП «Державного науково-дослідного і проектного інституту титану», ДП «Запорізького металургійного дослідно-промислового заводу», виготовлених з губчатого титану виробництва ТОВ «Запорізького титано-магнієвого комбінату»;
- знизити вартість виготовлення запорних кранів, перекачувальних насосів та іншого обладнання, що працюють в агресивних середовищах металургійної та хімічної промисловості;
- підвищити надійність і довговічність обладнання.

4. Згідно з актами підприємств, сумарний річний очікуваний економічний ефект від впровадження матеріалів роботи становить 217000 грн.

ВИСНОВКИ

У дисертації представлено результати теоретичних і експериментальних досліджень, які спрямовані на вирішення актуальної науково-прикладної матеріалознавчої задачі – підвищення механічних і службових властивостей зварних з'єднань спеченого титану для виробів складної конфігурації, що отримані за комплексною технологією та призначені для експлуатації в агресивних середовищах. Результати досліджень показали технічну та економічну доцільність виготовлення простих за конфігурацією виробів методом порошкової металургії з подальшим їх зварюванням для отримання запорних кранів, деталей насосів та ін.

1. Досліджено вплив фракційного складу порошків і тиску пресування на структуру, механічні властивості і характер руйнування спеченого титану. Методами кількісної оптичної та електронної мікроскопії встановлено, що при збільшенні тиску пресування з 500 МПа до 900 МПа і зменшенні розміру частинок порошку марок ПТ з 0,8 мм до 0,1 мм в спечених заготовках знижується об'ємна частка пор з 33,0 % до 3,8 % і їх середній розмір зі 120 мкм до 21 мкм, твердість і границя міцності підвищуються в 2 рази, відносне подовження на 15...20 %. Встановлено, що при фракції порошку менше 0,55 мм і тиску пресування 700...900 МПа, пористість спечених заготовок не перевищує 7 %, розмір пор 62 мкм, границя міцності перевищує 345 МПа і твердість HB > 130.

2. Досліджено вплив на структуру і механічні властивості зварних з'єднань спеченого титану трьох видів зварювання: стикового оплавленням, конвекційним тертям і тертям перемішуванням. Встановлено, що найменші розміри зони зварного з'єднання спостерігались при конвекційному зварюванні тертям: ширина шва в 2 рази менше, ніж при стиковому оплавленні і в 20 разів менше, ніж при терті перемішуванням; ширина зони термомеханічного впливу – менше в 4...7 і 2 рази відповідно, що можна пояснити особливостями технологічних процесів. При конвекційному зварюванні тертям і стиковому оплавленні розмір

залишкових пор в зварних швах не перевищував 3 мкм, в зонах термомеханічного впливу – 5 мкм, внаслідок «заліковування» пор; розподіл домішкових елементів був рівномірним в об'ємі зварних з'єднань, а вміст знаходився на рівні: $O_2 \leq 0,18 \%$, $N_2 \leq 0,035 \%$.

3. Найбільш сприятливий вплив на механічні властивості мало конвекційне зварювання тертям. Цей вид зварювання забезпечував зменшення розміру та кількості пор, подрібнення структурних складових і підвищення границі міцності шву до 30 % в порівнянні з вихідним матеріалом і до 12 % в порівнянні із стиковим зварюванням оплавленням, що обумовлено наявністю радіальної складової навантаження, котра підсилювала процес формування дрібнозеренної та однорідної структури. Зварювання тертям перемішуванням не забезпечувало необхідний рівень механічних властивостей внаслідок насичення зварного шва оксидами, які були втілені інструментом з поверхні зразка.

4. Проведено дослідження впливу структури зварних з'єднань спеченого титану, що отримані конвекційним зварюванням тертям, на електрохімічну і загальну корозійну стійкість. Гравіметричним методом і електрохімічними дослідженнями встановлено, що корозійна стійкість металу зон шва і термомеханічного впливу зварного з'єднання вище в порівнянні з основним металом. Потенціал корозії зварного шву та колошовної зони в порівнянні з потенціалом корозії основного металу ушляхетнюється (- 0,270 В проти - 0,365 В і - 0,196 В проти - 0,416 В), а щільність струму корозії знижується ($0,162 \text{ А/м}^2$ проти $0,207 \text{ А/м}^2$ і $0,77 \text{ А/м}^2$ проти $0,151 \text{ А/м}^2$) відповідно в 20 % хлоридної і 40 % сульфатної кислотах. Дані зміни мають місце завдяки формуванню однорідної структури і суттєвого підвищення густини зварного шву та колошовної зони.

5. В результаті теоретичних і експериментальних досліджень отримано нові результати про вплив фракційного складу порошків, тиску пресування і способів зварювання на формування структури, характер руйнування, механічні і службові властивості спеченого конструкційного титану та його зварних з'єднань. Встановлено оптимальні режими, що гарантують формування структури, яка забезпечує максимальні рівні механічних і службових властивостей спеченого

конструкційного титану та його зварних з'єднань. Доведена можливість застосування зварних з'єднань спеченого титану в агресивних середовищах взамін сплавів титану типу BT1-0, що отримані за традиційними технологіями лиття та деформування.

6. Розроблена нова ресурсозберігаюча технологічна схема отримання виробів складної конфігурації з порошку титану, яка базується на застосуванні методів порошкової металургії і подальшого зварювання. Розроблена схема, в порівнянні з технологією лиття, має більш високий КВМ, виключає процеси вакуумних переплавлень титану, забезпечує стабільний склад і механічні властивості матеріалу і доцільна для використання при отриманні виробів для агресивних середовищ.

7. За розробленою технологічною схемою методом порошкової металургії і конвекційного зварювання тертям на промислових підприємствах виготовлено деталі запорної арматури, насосів і пруткові заготовки діаметром до 38 мм й довжиною 700 мм. Промислова апробація виробів на ТОВ «Авіа-Січ», ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат», ДП «Кремній-полімер», ДП «ДНДП Інститут титану» показала високу технічну і економічну ефективність розробленої технології, що підтверджено відповідними актами. Сумарний очікуваний річний економічний ефект від використання запропонованих розробок складає 217000 грн.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Теслевич С. М., Шварцман Л. Я., Жигунов Н. Н. Основные направления в стратегии развития исследовательских работ по усовершенствованию технологии производства титановых полуфабрикатов и изделий на КП «ЗТМК». *Ti-2007 в СНГ*: Сб. тр. междунар. конф. (Ялта, 15–18 апреля 2007). К., 2007. С. 25–33.
2. Хорев А. И. Фундаментальные и прикладные работы по термической и термомеханической обработке титановых сплавов для авиационной и ракетно-космической техники. *Ti-2011 в СНГ*: Сб. тр. междунар. конф. (Львов, 25–28 апреля 2011). К., 2011. С. 314–321.
3. Ночовная Н. А., Изотова А. Ю., Моисеев Н. В., Кашапов О. С. Формирование структуры в процессе изотермической штамповки лопаточных заготовок из ($\alpha+\beta$) жаропрочных титановых сплавов. *Ti-2011 в СНГ*: Сб. тр. междунар. конф. (Львов, 25–28 апреля 2011). К., 2011. С. 38–40.
4. Иванова Л. А., Кудрявцев А. С., Травин В. В. Опыт применения высокопрочных титановых сплавов в энергетическом оборудовании. *Ti-2009 в СНГ*: Сб. тр. междунар. конф. (Одесса, 17–20 мая 2009). К., 2009. С. 46–60.
5. Ахонин С. В. Международная конференция «Титан–2014 в СНГ». *Автоматическая сварка*. 2014. № 8. С. 62–63.
6. Ахонин С. В. XIII Международная конференция «Титан–2015 в СНГ». *Современная электрометаллургия*. 2015. № 2. С. 55.
7. Костин В. А., Григоренко Г. М., Григоренко С. Г. Построение расчетных термокинетических диаграмм анизотермических превращений титановых сплавов на основе алюминидов. *Современная электрометаллургия*. 2017. № 2. С. 45–52.
8. Костин В. А., Григоренко Г. М., Григоренко С. Г. Методика построения расчётных равновесных диаграмм состояния и термокинетических превращений титановых сплавов системы TiAl. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2018. Т. 40. С. 23–35.
9. Скворцова С. В., Дзунович Д. А., Шалин А. В., Потамошнев Д. В.,

Мамонтова А. Е. Деформируемость титановых сплавов при нормальной и повышенных температурах. *Ti-2011 в СНГ*: Сб. тр. междунар. конф. (Львов, 25–28 апреля 2011). К., 2011. С. 361–363.

10. Коваленко Т. А., Овчинников А. В. Влияние исходной структуры на механизмы разрушения и механические свойства субмикроструктурного титана. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2010. №1. С. 72–80.

11. Цыгуленко К.А. Титан. Проблемы производства. Перспективы. Аналитический обзор. Часть 1. *Титан*. 2005. №2 (17). С. 33–40.

12. Галецкий Л. С., Ремезова Е. А., Когон Э. Ш., Черниенко Н. Н. Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы титана Украины. *Ti-2007 в СНГ*: Сб. тр. междунар. конф. (Ялта, 15–18 апреля 2007). К, 2007. С. 34–38.

13. Ивасишин О. М., Саввакин Д. Г., Матвийчук М. В., Тэлин В. В., Шварцман Л. Я., Давыдов С. И., Ставицкий Ю. Л. Апробация порошков гидрированного титана производства КП «ЗТМК» в технологических процессах порошковой металлургии. *Ti-2007 в СНГ*: Сб. тр. междунар. конф. (Ялта, 15–18 апреля 2007). К, 2007. С. 73–77.

14. Зяхор И. В., Кучук-Яценко С. И. Сварка трением жаропрочной стали, полученной технологией литья порошков под давлением, со сталью 40Х. *Автоматическая сварка*. 2012. №9. С. 5–14.

15. Тэлин В. В., Теслевич С. М., Шварцман Л. Я. Разработка новых экономичных процессов и оборудования на КП «ЗТМК» в технологических процессах порошковой металлургии. *Ti-2007 в СНГ*: Сб. тр. междунар. конф. (Ялта, 15–18 апреля 2007). К, 2007. С. 60–64.

16. Selcuk C., Bond S., Woollin P. Joining processes for powder metallurgy parts: a review. *Powder Metallurgy*. 2010. No. 53(1). pp. 7–11.

17. Дрозденко В. А., Павлов В. А., Тер-Погосьянц Э. Д., Ляшенко А. П., Павлов В. В., Грига Ю. Л., Яценко А. П., Щербань Р. А. Опыт получения порошков титана, порошковых титановых изделий и материалов. *Ti-2007 в СНГ*:

Сб. тр. междунар. конф. (Ялта, 15–18 апреля 2007) К., 2007. С. 149–155.

18. Ивасишин О. М., Саввакин Д. Г., Гуменyak Н. М., Матвийчук М. В. Влияние водорода и легирующих элементов на особенности синтеза титановых сплавов с использованием гидрированного титана. *Ti–2011 в СНГ*: Сб. тр. междунар. конф. (Львов, 25–28 апреля 2011) К., 2011. С. 322–328.

19. Быков И. О., Овчинников А. В., Давыдов С. И., Дрозденко М. В., Леховицер З. В. Применение гидрированного титана с заданным содержанием кислорода для получения изделий методом порошковой металлургии. *Теория и практика металлургии*. 2011. № 1–2(80–81). С. 65–69.

20. Ивасишин О. М., Марковский П. Е., Саввакин Д. Г., Матвийчук Ю. В., Котречко С. А., Мешков Ю. Я., Шиян А. В. Влияние структуры конструкционных титановых сплавов на изменение деформационного упрочнения в области локальной пластической деформации. *Ti–2013 в СНГ*: Сб. тр. междунар. конф. (Донецк, 26–29 мая 2013) К., 2013. С. 287–296.

21. Яковлев М. Г., Жуплов М. В. Повышение производительности и качества обработки дисков ГТД из гранульных материалов за счет применения оптимальных режимов резания. *Климовские чтения–2014: перспективы направления развития авиадвигателестроения*: Сб. докладов междунар. научно-технической конф.: в 2-х т. СПб., 2014. Т.1. С. 281–291.

22. Антонюк С. Л., Король В. Н., Моляр А. Г., Замков В. Н., Топольский В. Ф. Сопротивление усталости сварных соединений опытного титанового сплава Т-110. *Автоматическая сварка*. 2004. № 2. С. 28–32.

23. Гуревич С. М. Сварка химически активных и тугоплавких металлов и сплавов. М.: Машиностроение, 1982. 95 с.

24. Зяхор И. В., Завертанный М. С., Чернобай С. В. Линейная сварка трением металлических материалов (Обзор) *Автоматическая сварка*. 2014. № 12. С. 29–36.

25. Кучук-Яценко С. И., Зяхор И. В., Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф. Расчетная оценка термдеформационных условий формирования соединений

жаропрочного сплава ЭИ698ВД при сварке трением. *Автоматическая сварка*. 2009. № 7. С. 8–13.

26. Хорев А.И. Влияние комплексного легирования на механические свойства сварных соединений и основного металла ($\alpha'' + \beta$)- и β -титановых сплавов. *Технология машиностроения*. 2007. №2. С. 29–34.

27. Блащук Б.Е., Шеленков Г.М. Сварка плавлением титана и его сплавов (обзор). *Автоматическая сварка*. 2005. №2. С. 38–46

28. Леонов, В. П., Михайлов В. И., Сахаров И. Ю. Влияние термических циклов различных методов сварки на структуру и коррозионно-механические свойства сварных соединений псевдо- α -сплавов титана. *Ti-2011 в СНГ*: Сб. тр. междунар. конф. (Львов, 25–28 апреля 2011). К., 2011. С. 71–79.

29. Кузнецов С. В., Леонов В. П., Михайлов В. И. Сопротивление деформированию и разрушению зон сварных соединений титановых псевдо- α -сплавов в условиях повышенных температур. *Ti-2013 в СНГ*: Сб. тр. междунар. конф. (Донецк, 26–29 мая 2013). К., 2013. С. 180–188.

30. Саенко В. Я., Полишко А. А., Рябинин В. А., Степанюк С. Н. Электронно-лучевая сварка листового технического титана BT1-0, упрочненного азотом в процессе дугошлакового переплава, и свойства полученных соединений. *Автоматическая сварка*. 2014. №11. С. 50–53.

31. Маркашова Л. И., Ахонин С. В., Григоренко Г. М., Кругленко М. Г., Кушнарера О. С., Петриченко И. К. Структура и свойства сварных соединений титановых сплавов, легированных кремнием. *Автоматическая сварка*. 2012. №11. С. 7–17.

32. Шелягин В. Д., Хаскин В. Ю., Ахонин С. В., Белоус В. Ю., Петриченко И. К., Сиора А. В., Палагеша А. Н., Сели Р. В. Особенности лазерно-дуговой сварки титановых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2012. №12. С. 36–40.

33. Шабдинов, М. Л., Измаилова Г. М., Джемилов Э. Ш. Перспективные аспекты использования лазерной термической технологии для сварки и резки

титановых сплавов. *Вісник Хмельницького національного університету*. Хмельницьк, 2011. № 5. С. 31–34.

34. Таранова Т. Г., Григоренко Г. М., Ахонин С. В., Сабокарь В. К., Задорожнюк О. М., Соломийчук Т. Г., Половецкий Е. В. Особенности формирования структурной и химической неоднородности в сварных соединениях экспериментальных титановых сплавов системы Ti-Si-X, выполненных пресовой сваркой. *Ti-2013 в СНГ: Сб. тр. междунар. конф.*, (Донецк, 26–29 мая 2013) К., 2013. С. 214–220.

35. Edmilson Otoni Correa. Weldability of iron based powder metal alloys using pulsed GTAW process, arc welding. ISBN: 978-953-307-642-3. InTech. URL: <https://www.intechopen.com/books/arc-welding/weldability-of-iron-based-powder-metal-alloys-using-pulsed-gtaw-process> (Last accessed: 23.10.2018).

36. Саввакин Д. Г., Матвийчук М. В., Гуменyak Н. М., Карпинец Д. И. Перспективы использования сплавов, полученных по гидридной технологии, для потребностей медицины. *Ti-2011 в СНГ: Сб. тр. междунар. конф.* (Львов, 25–28 апреля 2011). К.: РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины. С. 183–186.

37. Солнцев Ю. П., Бєліков С. Б., Волчок І. П., Шейко С. П. Спеціальні конструкційні матеріали: підруч. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя: "ВАЛПІС-ПОЛІГРАФ", 2010. 536 с.

38. Основи металургійного виробництва металів і сплавів: за ред. Чернеги Д. Ф., Готвянського Ю. Я. К.: Вища шк., 2006. 503 с.

39. Савицкий Е. М., Клячко В. С. Металлы космической эры: 2-е изд., доп. и перераб. М.: Металлургия, 1978. 120 с.

40. Томашов Н. Д., Альтовский Р. М. Коррозия и защита титана. М.: МАШГИЗ, 1963. 168 с.

41. Полькин И. С. Применение титана в различных отраслях промышленности. *Ti-2006 в СНГ: Сб. науч. трудов междунар. конф.* (Россия, Суздаль, 21–24 мая 2006). К.: Наукова думка, 2006. С. 26–31.

42. Тэлин В. В., Иващенко В. И., Червоный И. Ф. Анализ тенденций развития технологий, производства и потребления титана. *Титан*. 2005. №1. С. 70–73.
43. Фокин М. Н. Рускол Ю. С., Мосолов А. В. Титан и его сплавы в химической промышленности: справ. Л.: Химия, 1978. 199 с.
44. Коррозия: справочник: общ. ред. Л. Л. Шрайера. М.: Металлургия, 1981. 632 с.
45. Цвикер У. Титан и его сплавы. М.: Металлургия, 1979. 510 с.
46. Теслевич С. М., Шварцман Л. Я. Некоторые вопросы производства титана и его применения в энергетике и химическом машиностроении. *Повышение надежности сварных соединений при монтаже и ремонте технологического оборудования в энергетике: тезисы докл. науч.-практ. семинар. (12–15 окт. 2004)*. К., 2004. С. 42–43.
47. Шаповалова О. М. Иванова Л. Н. Коррозионная стойкость сплавов на основе Fe, Al, Mg и Ti в морской воде. *Перспективные задачи инженерной науки*. 2002. С. 93–104.
48. Погрелюк І. М., Овчинников О. В., Скребцов А. А., Швачко Х. С., Проскурняк Р. В., Лавриш С. М. Корозійні властивості титану, отриманого методом порошкової металургії. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2016. Т. 52. № 5. С. 88–92.
49. Pohrelyuk I. M., Ovchynnykov O. V., Skrebtsov A. A., Bakhmatyuk B. P., Shvachko Kh. S. Electrochemical Behavior of Titanium Synthesized by the Method of Powder Metallurgy in Hydrochloric Acid. *Materials Science*. 2016. Vol. 52. № 2. P. 246–252.
50. Проскурняк Р. В., Скребцов А. А., Швачко Х. С. Корозійна стійкість спеченого титану ВТ1-0 у водних розчинах неорганічних кислот. *Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи: Матеріали конференції КМН–2013 (Львів, 23–25 жовтня 2013)*. 2013. С. 257–260.

51. Саввакін Д. Г. Фізичні основи твердофазного синтезу титанових сплавів: автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук. Київ, 2013. 36 с.

52. Новые процессы и материалы порошковой металлургии титана: сб. научн. трудов. Запорожье, 1992. 83 с.

53. Ивасишин О. М., Саввакин Д. Г., Моксон В. Порошковая металлургия титановых сплавов с применением гидрированного титана. *Ti – 2006 в СНГ*: Сб. науч. тр. междунар. конф. (Россия, г. Суздаль, 21–24 мая 2006). К.: Наук. думка, 2006. С. 32–38.

54. Устинов В. С., Олесов Ю. Г., Антипин Л. Н. Порошковая металлургия титана. М. 1973. 248с.

55. Либенсон Г. А. Основы порошковой металлургии. М.: Металлургия, 1987. 208 с.

56. Петров А. И., Разуваева М. В. Начальная стадия процесса залечивания пор и трещин в поликристаллических металлах в условиях всестороннего сжатия. *Физика твердого тела*. 2005. Т. 47, № 5. С.880–885.

57. Петров А. И., Разуваева М.В. Кинетика залечивания пор и упрочнения меди при всестороннем сжатии. *Физика твердого тела*. 2002. Т. 72, № 8. С.130–132.

58. Петров А. И., Разуваева М. В., Синани А. Б., Никитин В. В. Влияние статического и динамического сжатия на залечивание пор в меди. *Физика твердого тела*. 1998. Т. 68, № 11. С. 125–127.

59. Борисовская Е. М., Назаренко В. А., Подрезов Ю. Н., Коряк О. С., Евич Я. И., Горбань Ф. В. Механические свойства порошкового титана на разных стадиях его получения. I. Кривые уплотняемости заготовок из титанового порошка. *Порошковая металлургия*. 2008. № 7/8. С. 43–52.

60. Подрезов Ю. Н., Назаренко В. А., Вдовиченко А. В., Даниленко В. И., Коряк О. С., Евич Я. И. Механические свойства порошкового титана на разных стадиях его получения. II. Механическое поведение пористых титановых прессовок. *Порошковая металлургия*. 2008. № 9/10. С. 46–54.

61. Подрезов Ю. Н., Назаренко В. А., Вдовиченко А. В., Даниленко В. И., Коряк О. С., Евич Я.И. Механические свойства порошкового титана на разных стадиях его получения. III. Анализ процесса контактообразования в порошковом титане по результатам исследования физико-механических свойств при спекании. *Порошковая металлургия*. 2009. № 3/4. С. 98–111.

62. Подрезов Ю. Н., Назаренко В. А., Лаптев А. В., Толочин А. И., Коряк О. С., Евич Я. И., Вдовиченко А. В. Механические свойства порошкового титана на разных стадиях его получения. IV. Физико-механические свойства и закономерности контактообразования в порошковом титане, полученным ГПД. *Порошковая металлургия*. 2009. № 5/6. С. 46–55.

63. Гогаев К. А., Назаренко В. А., Воропаев В. С., Подрезов Ю. Н., Вербило Д. Г., Коряк О. С., Окунь И. Ю. Механические свойства порошкового титана на разных стадиях его получения. V. Свойства титановой ленты полученной прокаткой порошка. *Порошковая металлургия*. 2009. № 11/12. С. 66–75.

64. Борисовская Е. М., Вербило Д. Г., Писаренко В. А. и др. Особенности структурообразования и механические свойства деформированного титана. *Физика и техника высоких давлений*. 2007. Т. 17, № 2. С. 110–118.

65. Мартынова И. Ф., Скороход В. В. Уплотнение пористого металла при объемном пластическом деформировании в отсутствии деформационного упрочнения. *Порошковая металлургия*. 1976. № 5. С. 14–17.

66. Мартынова И. Ф. Физические особенности пластической деформации пористых тел. *Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов*. К.: Наук. думка, 1985. С. 98–105.

67. Бабенко Е. П., Шаповалова О. М. Превращения при нагреве в титановых порошках электролитического способа производства. *Вестник двигателестроения*. 2012. №1. С. 147–151.

68. Івасишин О. М., Бондарчук О. Б., Гумен'як М. М. Поверхневі явища при нагріванні порошку гідриду титану. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2011. Т. 12, №4.

С. 900–907.

69. Гегузин Я. Е. Физика спекания: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1984. 312 с.

70. Гич Г. А. Теория спекания. *Успехи физики металлов*. 1956. Вып. 1. С. 120–154.

71. Ивасишин О. М., Саввакин Д. Г., Гуменyak Н. М. Влияние водорода и легирующих элементов на особенности синтеза титановых сплавов с использованием гидрированного титана. *Титан–2011 в СНГ*: сб. науч. тр. междунар. конф. (Львов, 25–28 апреля 2011). Киев, 2011. С 322–328.

72. Ильин А. А., Колачев Б. А., Носов В. К. и др. Водородная технология титановых сплавов. М.: «МИСиС», 2002. 392 с.

73. Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М: ВИС-МАТИ, 2009. 520 с.

74. Колачев Б. А., Шалин Р. Е., Ильин А. А. Сплавы накопители водорода: справ. М.: Металлургия, 1995. 384 с.

75. Ивасишин О. М., Саввакин Д. Г., Бондарева К. А. Производство титановых сплавов и деталей экономичным методом порошковой металлургии для широкомасштабного промышленного применения. *Наука та інновації*. 2005. Т.1. №2. С. 44–57.

76. Шаповалова О. М., Бабенко Е. П. Влияние температуры нагрева на процесс насыщения газами титановых порошков. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2008. №2. С. 93–98.

77. Ивасишин О. М., Моляр А. Г., Матвийчук М. В. Титановые пористые проницаемые материалы, полученные из смеси порошковых компонентов TiH_2 и $Al(C_5H_7O_2)_3$. *Титан–2011 в СНГ*: Сб. науч. тр. междунар. конф. (Львов, 25–28 апреля 2011). Киев, 2011. С 322–328.

78. Скребцов А. А., Овчинников А. В., Шевченко В. Г., Джуган А. А. Влияние содержания гидрированного титана в смеси порошков на механические свойства спеченного сплава ВТ1-0. *Строительство, материаловедение,*

машиностроение: Сб. науч. трудов. Дн-вск.: ПГАСА, 2014. № 73. С. 89–94.

79. Скребцов А. А., Овчинников А. В. Влияние характеристик порошков титана на механизмы разрушения спеченных титановых сплавов. *Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок*: Тезисы докл. междунар. науч.-техн. конф. (Алушта, 24–29 сентября 2012). Алушта, 2012. С. 108–110.

80. Назаренко В.А. Физико-механические свойства смесей из порошков титана и гидрида титана. Наукові нотатки: Міжвузівський збірник за напрямом «Інженерна механіка». № 32. Луцьк, 2011. С. 249–254.

81. Кипарисов С. С., Либенсон Г. А. Порошковая металлургия. М.: Металлургия. 1980. 496 с.

82. Матвийчук М. В., Саввакин Д. Г. Синтез высоколегированных титановых сплавов методом порошковой металлургии. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2010. №1. С. 81–84.

83. Справочник по сварке: в 4-х т.: под ред. Акулова А. И. М.: Машиностроение, 1971. Т. 4. 415 с.

84. Мороз Л. С., Чечулин Б. Б., Полин И. В., Буталов Л. В., Шулькин С. М., Горячев А. П. Титан и его сплавы. Том 1. Технически чистый титан. Л.: Государственное союзное издательство судостроительной промышленности, 1960. 517 с.

85. Фетисов Г. П., Гарифуллин Ф. А. Материаловедение и технология металлов. М.: Издательство Оникс, 2007. 624 с.

86. Селіверстов О. Г. Підвищення властивостей зварних з'єднань роторних деталей ГТД з титанового сплаву ВТ8: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Запоріжжя, 2016. 20 с.

87. Патон Б. Е. Технология электронно-лучевой сварки. К.: Наукова думка, 1987. 256 с. С. 120–130.

88. Шоршоров М. Х., Назаров Г. В. Сварка титана и его сплавов. М.: Машгиз, 1959. 136 с. С. 88–94.

89. *Titanium 2003: science and technology*: Proc. 10th World Conf. on titanium, edited by G Luetjering; J Albrecht. (Germany, Hamburg 13–18 jul. 2003). Weinheim: DGM: Wiley-VCH, 2004. Vol. 1–5. pp. 121–125.

90. *Titanium '95: science and technology*: proceedings of the eighth world conference on titanium, edited by P.A. Blenkinsop, W.J. Evans and H.M. Flower (UK Birmingham, 22–26 Oct., 1995). London : Institute of Materials, 1996. Vol. 3 p. 25.

91. Погребной Н. А., Зозуля В. Ф., Бугаев А. М. Ремонт лопаток паровых турбин после эрозионного износа. *Технология и организация производства*. 1976. № 11. С. 55–57.

92. Сварка в машиностроении: справочник в 4-х т., т. 2: под ред. Акулова А. И. М.: Машиностроение, 1971. 416 с.

93. Петрик И. А., Овчинников А. В., Басов Ю. Ф., Шевченко В. Г., Рягин С. Л., Селиверстов А. Г. Повышение работоспособности лопаток из титановых сплавов вентилятора авиадвигателя. *Вестник двигателестроения*. 2006. №4. С. 104–107.

94. Селиверстов А. Г., Ткаченко Ю. М., Куликовский Р. А., Брагинец В. И., Зяхор И. В. Влияние параметров режима сварки трением на структуру и механические свойства соединений титанового сплава ВТ3-1. *Автоматическая сварка*. 2013. № 1 (717). С. 29–34.

95. Селиверстов А. Г., Петрик И. А., Ткаченко Ю. М., Куликовский Р. А., Овчинников А. В. Исследование механических свойств сварных соединений сплава ВТ3-1, выполненных сваркой трением. *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2011. №4. С. 41–44.

96. Петрик И. А., Селиверстов А. Г., Овчинников А. В. Повышение свойств сварных соединений роторных деталей из титановых сплавов. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2014. №8. С. 25–29.

97. Жеманюк П. Д., Петрик И. А., Овчинников А. В., Селиверстов А. Г. Влияние способа сварки на структуру и механические свойства сварных соединений жаропрочных титановых сплавов с различным исходным состоянием.

Сварочное производство. 2015. №4. С. 6–11.

98. Бондарь А. В., Пешков В. В., Киреев Л. С., Шурупов В. В. Диффузионная сварка титана и его сплавов. Воронеж: ВГУ, 1998. 256 с.

99. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка материалов. М.: Металлургия, 1976. 312 с.

100. Каракозов Э. С., Орлова Л. М., Пешков В. В., Григорьевский В. И. Диффузионная сварка титана. М.: Металлургия, 1977. 271 с.

101. Пешков В. В., Петренко В. Р., Булков А. Б., Балбеков Д. Н. Механизм образования физического контакта при диффузионной сварке. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2011. Т. 7, № 10. С. 13–16.

102. Пешков В. В., Сафонов С. В., Булков А. Б., Стрыгин А. И., Балбеков Д. Н. Влияние микрогеометрии поверхности на кинетику развития физического контакта при высокотемпературной термомодеформационной обработке титана. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2012. Т.8, № 4. С. 140–145.

103. Пешков В. В., Сафонов С. В., Булков А. Б., Стрыгин А. И., Балбеков Д. Н. Моделирование процесса развития контакта при термомодеформационной обработке титана. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2012. Т.8, № 5. С. 108–114.

104. Пешков В. В., Сафонов С. В., Булков А. Б., Балбеков Д. Н., Небольсин С. М. Влияние технологических параметров на процесс диффузионной сварки титана. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2012. Т.8, № 7–1. С. 70–75.

105. Пешков В. В., Булков А. Б., Корчагин И. Б., Ларсов С. М. Диффузионная сварка титана с использованием давления на начальном этапе. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2017. Т. 13, № 5. С. 95–99.

106. Вилль В. И. Сварка металлов трением. Л.: Машиностроение, 1970.

176 с.

107. Зяхор И.В. Современное оборудование для сварки трением. *Автоматическая сварка*. 2001. № 7 (580). С. 48–52.

108. Defalco J., Steel R. Сварка стальных труб трением с перемешиванием. *Автоматическая сварка*. 2010. № 4. С. 62.

109. Селиверстов А. Г., Петрик И. А., Овчинников А. В. Исследование механических свойств сварных соединений сплава ВТ3-1, выполненных сваркой трением. *Титан–2012: производство и применение: Тезисы докл. всеукр. науч.-техн. конф.* (Запорожье, 4–5 окт. 2012). Запорожье, 2012. С. 40–42.

110. M. Ashfaq Carl Hanser Verlag Friction Welding of Titanium to 304L Stainless Steel Using Interlayers (Reibschweißen von Titan an nichtrostendem Stahl 304L unter Anwendung von Zwischenschichten). München Prakt: Metallogr, 2011. 484 p.

111. Yoshiaki Yamamoto Fatigue Strength of Friction-Welded 6061 Aluminum Alloy Joints. *Materials Transactions*, 2007. Vol. 48. No. 11.

112. Jay Prakash A review on effects of processing parameters on mechanical behavior of different metals joined continuous drive friction welding. *Gavade IJESR*, 2013.

113. Eder Paduan Alves J. Experimental Determination of Temperature During Rotary Friction Welding of AA1050 Aluminum with AISI 304 Stainless Steel *Aerosp. Technol. Manag.*, 2012. Vol.4. No. 1. pp. 61–67.

114. Avinash S. Pachal Taguchi Optimisation of Process Parameters in Friction Welding of 6061 Aluminium Alloy and 304 steel. *International Journal of Emerging: Technology and Advanced Engineering*, 2013. Vol. 3. Issue 4.

115. Hong Liu Grain Orientation and Texture Evolution in Pure Titanium Lap Joint Produced by Friction Stir Welding. *Materials Transactions*, 2010. Vol.51. No. 11. pp. 2063–2068.

116. M. Corzo Fracture behaviour of friction welds in titanium alloys. *Anales de la Mecanica de Fractura*, 2007. Vol 1. pp 75–81.

117. Миддельдорф К., Хофе фон Д. Тенденции развития технологий соединения материалов. *Автоматическая сварка*. 2008. № 11. С. 39–47.

118. Покляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Подбельников С. В. Влияние параметров процесса сварки трением с перемешиванием на формирование швов соединений алюминиевых сплавов толщиной 1,8...2,5 мм. *Автоматическая сварка*, 2008 № 10, С. 27–30.

119. Покляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Яворская М. Р. Прочность соединений тонколистовых алюминиевых сплавов, полученных сваркой трением с перемешиванием. *Автоматическая сварка*. 2007. № 9. С. 50–53.

120. Ищенко А. Я., Подбельников С. В., Покляцкий А. Г. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов (Обзор). *Автоматическая сварка*. 2007. № 11. С. 32–38.

121. Покляцкий А. Г. Характерные дефекты при сварке трением с перемешиванием тонколистовых алюминиевых сплавов и основные причины их образования. *Автоматическая сварка*. 2008. № 6. С. 48–52.

122. Покляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Чайка А. А., Лабур Т. М. Сварка трением с перемешиванием – эффективный способ повышения эксплуатационных характеристик конструкций. *Автоматическая сварка*. 2010. № 4. С. 45–49.

123 Покляцкий А. Г., Чайка А. А., Клочков И. Н., Яворская М. Р. Сварка трением с перемешиванием алюминиевых сплавов различных систем легирования. *Автоматическая сварка*. 2010. № 10. С. 3–8.

124. Покляцкий А. Г., Ищенко А. Я., Федорчук В. Е. Сварка трением с перемешиванием композиционных, гранулированных и квазикристаллических алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*. 2011. № 7. С. 18–22.

125. Вакуленко І. О., Плітченко С. О., Надєждін Ю. Л. (2012) Спосіб зварювання тертям з перемішуванням сплавів на основі алюмінію. Україна, Пат. 75698, МПК В23К 1/00; заявник і патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. U201206529.

126. Вакуленко І. О., Плітченко С. О., Надєждін Ю. Л. Використання

технології зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпро, 2012, С. 230–233.

127. Vakulenko I. O., Plitchenko S. O. Determination activation energy of friction stir welding. *Welding and related technologies*.: Proc. of 9th Intern. Conf. of young scientists (Ukraine, Kyiv, 23–26 May 2017). Kyiv. pp. 54–58.

128. Вакуленко І. О., Мітяєв О. А., Плітченко С. О. Про структурні перетворення при зварюванні тертям з перемішуванням алюмінієвого сплаву. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. Запоріжжя, 2014. № 1, С. 8–10.

129. Штрикман М. М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений (аналитический обзор) Ч. 1. *Сварочное производство*. 2007. № 10. С. 25–32.

130. Жадкевич М. Л., Третьак Н. Г., Кавуненко П. М., Зеленин В. И., Мохорт В. А., Зеленин Е. В. Сварка и наплавка трением с перемешиванием меди и ее сплавов. *Автоматическая сварка*. 2007. № 11. С. 28–31.

131. Штрикман М. М. Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений (аналитический обзор) Ч. 1. *Сварочное производство*. 2007. № 9. С. 35–40.

132. Патон Б. Е., Ищенко А. Я., Устинов А. И. Применение нанотехнологии неразъемного соединения перспективных легких металлических материалов для аэрокосмической техники. *Автоматическая сварка*. 2008. № 12. С. 5–11.

133. Russell M. J., Blignault C. Recent developments in FSW of Ti alloys 6th *International Symposium on Friction Stir Welding*. Montreal (Canada), 2006.

134. Bernath J. J. FSW of Ti–6Al–4V structural components 6th *International Symposium on Friction Stir Welding*. Montreal (Canada), 2006.

135. Loftus Z. FSW of 5 mm Ti–6Al–4V 6th *International Symposium on Friction Stir Welding*. Montreal (Canada), 2006.

136. Поляков С. Г., Ныркова Л. И., Мельничук С. Л., Гапула Н. А.

Диагностика коррозионного состояния внутренней поверхности магистрального нефтепровода. *Автоматическая сварка*. 2010. № 12 (490). С. 24–28.

137. Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов: 2-е изд., перераб. и доп. К.: Наук. думка, 1990. 512 с.

138. Рускол Ю. С. Титановые конструкционные сплавы в химических производствах: справочное издание. М.: Химия, 1989. 288 с.

139. Топольский В. Ф., Белоус В. Ю., Ахонин С. В. Григоренко Г. М. Применение присадочной проволоки СП15св для сварки титанового сплава ПТ-3в. *Ti-2007в СНГ*: Сб. тр. Междунар. конф. (Ялта, 15–18 апреля 2007). К.: РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, 2007. С. 273–275.

140. Блащук В. Е., Замков В. Н., Оноприенко Л. М., Шеленков Г. М., Трояновский В. Э. Влияние технологии изготовления полуфабрикатов из титанового сплава АТЗ на коррозионную стойкость сварных соединений. *Автоматическая сварка*. 1994. № 1 (490). С. 33–35.

141. Блащук В. Е., Поляков С. Г. Ускоренное определение склонности сварных соединений титановых сплавов к коррозионному растрескиванию. *Автоматическая сварка*. 1996. № 6 (519). С. 13–16.

142. Kostin V.A., Grigorenko G.M., Zuber T.A. Peculiarities of Structural Transformations in HAZ Metal of Rail Steel M76 Joint Produced by Flash-Butt Welding. *Journal of Physical Science and Application* 2016. No. 5. pp. 54–65.

143 Труфанов А. А., Мелехов Р. К., Смиян О. Д., Шер В. А. Коррозионное растрескивание сварных соединений высокопрочного титанового сплава. *Автоматическая сварка*. 1990. № 5 (446). С. 31–36.

144. Смиян О. Д., Григоренко Г. М., Блащук В. Е., Буткова Е. И., Оноприенко Л. М., Труфанов А. А. Коррозионная стойкость сварных соединений титанового сплава АТЗ в растворах серной кислоты. *Автоматическая сварка*. 1989. № 12 (441). С. 41–44.

145. Пичугин А. Т., Федирко В. Н., Лукьяненко А. Г., Лавренко И. Г. Влияние факторов отжига на усталостную долговечность сварных соединений

титановых сплавов ВТ1-0 ПТ7М. *Ti-2007 в СНГ*: Сб. тр. Междунар. конф. (Ялта, 15–18 апреля 2007). К.: РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, 2007. С. 431–440.

146. Шеленков Г. М., Трояновский В. Э., Блащук В. Е., Оноприенко Л. М. Коррозионная стойкость сварных соединений некоторых титановых сплавов. *Автоматическая сварка*. 1985. № 4 (385). С. 19–20.

147. Леонов В. П., Михайлов В. И., Сахаров И. Ю. Влияние термических циклов различных методов сварки на структуру и коррозионно-механические свойств сварных соединений псевдо- α -сплавов титана. *Ti-2011 в СНГ*: Сб. тр. Междунар. конф. (Львов, 25–28 апр. 2011). К.: РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, 2011. С. 71–79.

148. Махненко В. И., Шекера В. М., Оноприенко Е. М. Определение параметров упрощенной диаграммы статической коррозионной трещиностойкости трубных сталей при почвенной коррозии. *Автоматическая сварка*. 2008. № 10. С. 31–35.

149. Блащук В. Е., Оноприенко Л. М., Шеленков Г. М., Трояновский В. Э. Солевая коррозия сварных соединений сплава АТ6. *Автоматическая сварка*. 1990. № 3. С. 68–69.

150. Лангер М. А., Блащук В. Е., Оноприенко Л. М., Шеленков Г. М. Солевая коррозия сплава АТЗ и сварных соединений. *Автоматическая сварка*. 1983. № 10. С. 69–70.

151. Прилуцкий В. П., Ахонин С. В. Сварка титановых сплавов вольфрамовым электродом в аргоне с применением флюсов. *Ti-2007 в СНГ*: Сб. тр. Междунар. конф. (Ялта, 15–18 апреля 2007). К.: РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, 2007. С. 423–430.

152. Таранова Т. Г., Григоренко Г. М., Ахонин С. В., Сабокарь В. К., Задорожнюк О. М., Соломийчук Т. Г., Половецкий Е. В. Особенности формирования структурной и химической неоднородности в сварных соединениях экспериментальных титановых сплавов системы Ti-Si-X,

выполненных прессовой сваркой. *Ti-2013 в СНГ*: Сб. тр. Междунар. конф. (Донецк, 26–29 мая 2013). К.: РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, 2013. С. 214–220.

153. Ахонин С. В., Топольский В. Ф., Мищенко Р. Н., Петриченко И. К., Вржижевский Э. Л. Свариваемость и служебные характеристики титанового листа ВТ6, полученного методами ВДП и ЭЛП. *Ti-2006 в СНГ*: Сб. тр. Междунар. конф. (Суздаль, 21–24 мая 2006). К.: Наукова думка, 2006. С. 44–50.

154. Чернышова Ю. В. Закономерности влияния объемной и поверхностной структуры на электрохимическую коррозию имплантатов из сплавов на основе титана и никелида титана: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2008. 22 с.

155. Коррозия: под ред. Шрайера Л. Л. М.: Металлургия, 1981. 632 с.

156. Хорев А. Н. Разработка теоретических и практических основ повышения конструкционной прочности титановых сплавов термической, термомеханической обработкой и текстурным упрочнением. *Ti-2007 в СНГ*: Сб. тр. Междунар. конф. (Ялта, 15–18 апреля 2007). К.: РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, 2007. С. 423–430.

157. Бецофен С. Я., Смирнов В. Г., Ашмарин А. А. Количественные характеристики текстуры и анизотропии механических свойств трубных заготовок из сплавов титана. *Ti-2009 в СНГ*: Сб. тр. Междунар. конф. (Одесса, 17–20 мая 2009). К.: РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, 2009. С. 400–403.

158. Дзунович Д. А., Шалин А. В., Потамошнев Д. В., Макаров А. А. Влияние пластической деформации и термической обработки на формирование текстуры и анизотропию механических свойств в листовых полуфабрикатах из титановых сплавов. *Ti-2012 в СНГ*: Сб. тр. Междунар. конф. (Казань, 22–25 апреля 2012). К.: РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, 2012. С. 282–284.

159. Илларионов С. Ю., Добрушин Л. Д., Поляков С. Г., Боева Г. Е. Повышение коррозионной стойкости сварных соединений высокопрочных алюминиевых сплавов плакированием взрывом. *Автоматическая сварка*. 2005.

№ 2. С. 52–55.

160. Стеклов О. И., Антонов А. А., Севостьянов С. П. Обеспечение целостности сварных конструкций и сооружений при их длительной эксплуатации с применением реновационных технологий. *Автоматическая сварка*. 2014. № 6–7 (733). С. 1–6.

161. Овчинников О. В., Погрелюк І. М., Скребцов А. А., Проскурняк Р. В., Швачко Х. С. Корозійна тривкість титану VT1-0 та шляхи її підвищення. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2013. № 1. С. 20–25.

162. Скребцов А. А., Погрелюк І. М., Лук'яненко О. Г., Пічугін А. Т. Вплив оксидування на корозійну тривкість спеченого титану. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2013. № 3. С. 63–69.

163. Скребцов А. А., Погрелюк І. Н., Лукьяненко А. Г., Пичугин А. Т., Проскурняк Р. В. Влияние химико-термической обработки на коррозионную стойкость спеченного титана в агрессивных средах. *Ti-2013 в СНГ: Сборник трудов Междунар. конф. (Донецк, 26–29 мая 2013)*. К.: РИО ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, 2013. С. 174–179.

164. Скребцов А. А., Овчинников А. В., Капустян А. Е. Исследование структуры сварных соединений спеченных титановых сплавов. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. Дн-вск, ПГАСА, 2012. Вып. 64*. С. 403–408.

165. Скребцов А. А., Овчинников А. В., Капустян А. Е. Исследование механических свойств сварных соединений спеченных титановых сплавов. *Вісник СевНТУ. Серія: Механіка, енергетика, екологія: Збірник наук. праць*. Севастополь: СевНТУ, 2012. Випуск 132. С. 14–17.

166. Махненко В. И., Шекера В. М., Великоиваненко Е. А., Олейник О. И., Розынка Г. Ф., Пивторак Н. И. Анализ условий возникновения и развития коррозионных трещин в зоне кольцевых сварных соединений магистральных газопроводов. *Автоматическая сварка*. 2009. № 5. С. 5–11.

167. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Коваленко Т. А., Шевченко А. В.

Получение полуфабрикатов титановых сплавов для авиационно-космической техники. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2016. № 7 (134). С. 107–116.

168. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Осипенко А. В. Ресурсосберегающая технология получения полуфабрикатов из титановых сплавов серии low-cost. *Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок: Тезисы докладов X Международной научно-технической конференции* (Алушта, 23–28 сентября 2013). Запорожье: АО «Мотор Сич», 2013. С. 10–12.

169. Акритова Т. О., Овчинников О. В., Капустян О. Є. О необхідності дослідження корозійної тривкості зварних швів спеченого титану. *Людина і Космос: Тези доп. XX Міжнар. молодіжної наук.-практ. конф.* (Дніпро, 11–13 квітня 2018). Дніпро, 2018. С. 235.

170. Капустян О.Є., Ніколаєв В.М., Овчинников О.В. Розширення сфери застосування титанових сплавів. *Титан 2018: виробництво та використання в Україні: Збірник доп. міжнар. конф.* / Під ред. проф. С.В. Ахоніна. (Київ, 11–13 червня 2018). К.: ТОВ «ДИА», 2018. С. 71–73.

171. Скотникова М.А., Мартынова М.А. Практическая электронная микроскопия в машиностроении. Санкт-Петербург: ПИМаш. 2005. 92 с.

172. Vydehi Arun Joshi. Titanium alloys: an atlas of structures and fracture features. London: New York: Taylor&Francis Group, 2006. 227 p.

173. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1976. 271 с.

174. Степнов М. Н., Шаврин А. В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. М: Машиностроение, 2005. 399 с.

175. Дурягіна З. А., Тростянчин А. М., Лемішка І. А., Джуган О. А. Гранулометричні характеристики порошку титанового сплаву ВТ6, отриманого методом відцентрового плазмового розпилення електроду. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2016. №2. С. 26–28.

176. Дурягіна З. А., Тростянчин А. М., Лемішка І. А., Скребцов А. А., Овчинников О. В. Гранулометричні характеристики порошку титанового сплаву BT20 отриманого методом відцентрового плазмового розпилення електроду. *Металознавство та обробка металів*. 2017. №1. с. 45–51.

177. Tkachenko R., Duriagina Z., Lemishka I., Izonin I., Trostianchyn A. Development of machine learning method of titanium alloy properties identification in additive technologies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 3. No. 12 (93). 2018. pp. 23–31.

178. Duriagina Z.A., Tkachenko R.O., Trostianchyn A.M., Lemishka I.A., Kovalchuk A.M., Kulyk V.V., Kovbasyuk T.M. Determination of the best microstructure and titanium alloy powders properties using neural network. *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*. No. 87/1. 2018. pp. 25–31.

179. Duriagina Z., Trostyanchyn A., Lemishka I., Skrebtsov A., Ovchinnikov O. The influence of chemical-thermal treatment on granulometric characteristics of titanium sponge powder. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. No. 1. pp. 73–80.

180. Шаповалова О.М., Бабенко Е.П. Структура и свойства прессованных и спеченных изделий из титановых порошков. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2004. № 2. С. 24–27.

181 Шаповалова О.М., Бабенко Е.П. Некоторые особенности в изготовлении конструкционных спеченных изделий из титановых порошков электролитического способа производства. *Вестник двигателестроения*. 2007. № 1. С. 160–163.

182 Шаповалова О.М., Мовчан Е.П., Койгушский Н.Н. Исследование структуры и свойств спеченных изделий из титановых порошков URL: <http://www.researchgate.net/publication/259952037> (дата звернення: 06.06.2018).

183. Ivasishin O.M., Bondareva K.A., Bondarchuk V.I. Fatigue resistance of powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy. *Plenum Publishing Corporation*. 2004.

pp. 225–230.

184. Ивасишин О.М., Саввакин Д.Г., Матвийчук М.В. Микроструктура и свойства сплава Ti-10V-2Fe-3Al, синтезированного методом порошковой металлургии. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2009. №8 (31). С. 21–29.

185. Павленко Д. В. Техничко-економические аспекты технологических схем получения заготовок из титановых сплавов для лопаток ГТД. *Вестник двигателестроения*. 2014. № 2. С. 87–92.

186. Павленко Д. В., Овчинников А. В. Техничко-економические аспекты технологических схем получения заготовок из титановых сплавов для лопаток ГТД. *Вестник двигателестроения*. 2014. №1. С. 98–103.

187. Павленко Д. В. Технологические методы уплотнения спеченных титановых заготовок. *Вестник двигателестроения*. 2015. № 1. С. 87–93.

188. Бабенко Е.П., Шаповалова О.М. Превращения при нагреве в титановых порошках электролитического способа производства. *Вестник двигателестроения*. 2012. №1. С. 147–151.

189. Івасишин О.М., Бондарчук О.Б., Гуменyak М.М. Поверхневі явища при нагріванні порошку гідриду титану. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2011. Т. 12. №4. С. 900–907.

190. Шаповалова О.М., Бабенко Е.П. Влияние режимов термической обработки на структуру изделий из титановых порошков разного производства. *Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов в машиностроении*: Сб. тр. 7-й Международной научно-технической конференции. (Харьков, 24–28 апреля, 2006). URL: <http://www.researchgate.net/publication/25984152> (дата звернення: 05.06.2018).

191. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания. К.: Наук. думка, 1972. 152 с.

192. Штерн М.Б., Сердюк Г.Г., Максименко Л.А. Феноменологическая теория прессования порошков. Киев: Наук. думка, 1982. 140 с.

193. Реут О.П., Богинский Л.С., Петюшин Е.Е. Сухое изостатическое

прессование уплотняемых материалов. Минск: Дэбор, 1998. 258 с.

194. Кунин Н.Ф., Юрченко Б.Д. Закономерности прессования порошков различных материалов. *Порошковая металлургия*. 1963. №6. С. 3–10.

195. Жданович Г.М. Теория прессования металлических порошков. М.: Металлургия, 1969. 264 с.

196. Андреева Н.В., Радомысельский И.Д., Щербань Н.И. Исследование уплотняемости порошков. *Порошковая металлургия*. 1975. №6. С. 32–42.

197. Радомысельский И.Д., Щербань Н.И. Некоторые особенности уплотнения порошков на стадии прессования. *Порошковая металлургия*. 1980. №11. С. 12–19.

198. Петров А.И., Разуваева М.В. Начальная стадия процесса залечивания пор и трещин в поликристаллических металлах в условиях всестороннего сжатия. *Физика твердого тела*. 2005. № 5. Т. 47. С.880–885.

199. Гегузин Я.Е. Физика спекания: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1984. 312 с.

200. Гич Г.А. Теория спекания. *Успехи физики металлов*. 1956. Вып. 1. С. 120–154.

201. Илларионов А. Г., Попов А. А. Технологические и эксплуатационные свойства титановых сплавов: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 137 с.

202. Винарский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. К.: Техника, 1975. 168 с.

203. Новик Ф. С., Арсов Я. К. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. М.: Машиностроение, 1980. 304 с.

204. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Павлов В. В., Шульга К. С., Шевченко В. Г. Влияние режимов прессования и спекания на пористость спеченных титановых изделий. *Обработка материалов давлением: Сб. науч. трудов*. Краматорск: ДГМА, 2015. № 2 (41). С. 221–225.

205. Капустян О. Є., Овчинников О. В., Янко Т. Б. Спечені титанові сплави

для ядерної енергетики. *Питання атомної науки і техніки*. Серія «Вакуум, чисті матеріали, надпровідники». 2018. № 1 (113). С. 134–141.

206. Скребцов А. А., Овчинников А. В., Шевченко В. Г., Капустян А. Е., Джуган А. А. Влияние содержания гидрированного титана в смеси порошков на механические свойства спеченного сплава ВТ1-0. *Строительство, материаловедение, машиностроение*: Сб. науч. трудов. Дн-вск: ПГАСА, 2014. Вып. 73, ч. 4. С. 89–94.

207. Суцїнський О. Д., Овчинников О. В.; Капустян О. Є., Янко Т. Б., Акритова Т. О. Спечені титанові сплави для ядерної енергетики. *Высокочистые материалы: получение применение, свойства*: Матеріали доповідей 4-ї Міжнародної конференції (Харків, 12–15 вересня 2017). Харків: ННЦ ХФТИ, 2017. С. 87.

208. Никитина Е.В. Механизм образования пористости в зоне термического влияния при сварке плавлением гранулированного материала. *Сварочное производство*. 2006. № 1. С. 12–17.

209. Киреев Л. С., Замков В. Н. Сварка титана со сталью в твердой фазе (обзор). *Автоматическая сварка*. 2002. № 7. С. 34–40.

210. Зяхор И. В., Великоиваненко Е. А., Розынка Г. Ф. Расчетная оценка термодеструкционных условий формирования соединений жаропрочного сплава ЭИ698ВД при сварке трением. *Автоматическая сварка*. 2009. № 7. С. 8–13.

211. Кучук-Яценко С. И., Зяхор И. В., Горлань Г. Н. Влияние технологических параметров и динамики торможения при сварке трением на структуру и свойства соединений меди с алюминием. *Автоматическая сварка*. 2002. № 6. С. 3–8.

212. Лебедев В. К., Черненко И. А., Михальски Р., Вилль В. И. Сварка трением: справочник: под общ. ред. В. К. Лебедева, И. А. Черненко, В. И. Вилля. Л.: Машиностроение, 1987. 236 с.

213. Овчинников В. В. Современные виды сварки: учеб. пособие для нач. проф. образования. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 208 с.

214. Банов М. Д., Максаков В. В., Плюснина Н. П. Специальные способы сварки и резки: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования. Москва: «Академия», 2013. 208 с.

215. Овчинников А. В. Применение титановых сплавов с субмикроструктурной структурой для восстановления деталей роторной части ГТД. *Автоматическая сварка*. 2012. №2. С. 21–25.

216. Калахан О., Охота Г. Вплив іонної імплантації азотом на електрохімічну поведінку титанових сплавів різного фазового складу // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: В 2-х т. / Спецвипуск журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів». Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2004. №4. Т. 2. С. 548–552.

217. Федірко В., Гурин С., Дюг І., Яськів О. Електрохімічна поведінка титану з карбоксильними покриттями у водному розчині сульфатної кислоти // Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів: В 2-х т. / Спецвипуск журналу «Фізико-хімічна механіка матеріалів». Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2004. №4. Т. 2. С. 513–515.

218. Pohrelyuk I. M., Tkachuk O. V., Proskurnyak R. V. Corrosion resistance of the Ti-6Al-4V titanium alloy with nitride coatings in 0.9 % NaCl. *Journal of the minerals metals & materials society*. 2011. No. 63 (6). pp. 35–40.

219 Капустян А. Е., Овчинников А. В., Вакуленко И. А. Получение сварных изделий из спеченных титановых сплавов. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2014. № 3 (51). С. 84–91.

220. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Павлов В. В., Шульга К. С. Интегрированная технология получения полуфабрикатов из титановых сплавов на основе методов порошковой металлургии и сварки. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2014. № 2. С. 93–95.

221. Овчинников А. В., Капустян А. Е., Давыдов С. И., Павлов В. В. Ресурсосберегающая технология получения длинномерных полуфабрикатов из

титановых сплавов методом порошковой металлургии. *Технологические системы*. 2013. № 4 (65). С. 29–33.

222. Капустян А. Е. Получение длинномерных полуфабрикатов из спеченных титановых сплавов сваркой трением. *Автоматическая сварка*. 2015. № 3–4. С. 55–59.

223. Беліков С. Б., Давидов С. І., Івасишин О. М., Овчинников О. В., Шевченко В. Г., Осипенко О. В., Капустян О. Є., Биков І. О., Саввакін Д. Г. Гідрид титану губчастого, легований киснем. Україна, Пат. 74771 UA, МПК (2012.01) C01B 6/00; заявники і патентовласники Запорізький національний технічний університет. № u201204989 ; заявл. 23.04.2012 ; опубл. 12.11.2012, Бюл. №21/2012.

224. Капустян О. Є., Акритова Т. О., Савонов Ю. М. Отримання довгомірних пруткових заготовок з титану методами порошкової металургії. *Титан–2016: виробництво та використання в авіабудуванні: Збірник тез доповідей IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Запоріжжя, 3–4 листопада 2016)*. Запоріжжя: АТ «Мотор Січ», 2016. С. 52–54.

ДОДАТОК А

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе ЗНТУ,
проф.

В.В. Наумик

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Авиа-Сич»



В.Н. Николаев

АКТ

внедрения научно-исследовательских работ

« 10 » 11 2017 г.

г. Запорожье

Комиссия в составе:

Председатель комиссии:

директор ООО «Авиа-Сич» Николаев В.Н.

Члены комиссии:

гл. инженер ООО «Авиа-Сич» Демочкин В.Я.

директор НИЦ «Титан Запорожья» ЗНТУ, д-р техн. наук

Овчинников А.В.

научный сотрудник НИЦ «Титан Запорожья» Капустян А.Е.

Составила настоящий акт о том, что на ООО «Авиа-Сич» проводились работы по внедрению полуфабрикатов ø 38 мм высотой 45 мм спеченных из порошка ПТ5 ТУ У 14-10-026-98 с последующей сваркой трением. Полуфабрикаты, получаемые по разработанной НИЦ «Титан Запорожья» ЗНТУ технологии, могут обеспечить замену импортных прутков из титанового сплава типа BT1-0 ГОСТ 19807-91, получаемых по традиционной технологии (литье и деформирование). Из опытных заготовок на ООО «Авиа-Сич» изготовили корпуса кранов дисковых DN15 и DN20 PN16 (ГОСТ 21345-2005), а также корпуса кранов шаровых муфтовых DN15 и DN20 PN16 (ТУ У 29.1-32638366-001:2005) — по 5 шт. каждого наименования. Краны предназначены для установки в качестве запорных устройств на технологических и магистральных линиях транспортирующих агрессивные среды по отношению к которым титановый сплав коррозионностоек.

Исполнителем работ является Капустян Алексей Евгеньевич.

Комиссия установила, что в ходе проведения работы реализована технология изготовления изделий химической промышленности, на примере корпусов кранов, из порошков ПТ5. Разработана технология спекания полуфабрикатов из титанового сплава типа BT1-0, последующего их сваривания, обеспечивающая получение заданного уровня механических свойств и коррозионной стойкости.

В результате испытаний корпусов кранов, изготовленных по опытной технологии из спеченного сплава типа BT1-0 с последующим свариванием установлено:

- заготовки имели хорошую обрабатываемость токарной и фрезерной обработкой;

- испытания герметичности кранов произведены при давлении 2,4 МПа показали полную непроницаемость кранов.

Прутковые полуфабрикаты, полученные методами порошковой металлургии и сварки рекомендованы для замены импортных прутковых полуфабрикатов и рекомендованы в применении для изготовления корпусов кранов.

В основе проведенных работ лежат материалы научных разработок Капустяна А.Е.

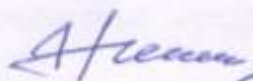
Комиссия постановила, что результаты работ Капустяна А.Е. внедрены в производство на ООО «Авиа-Сич» в следующем виде: разработан проект технологии изготовления из спеченных титановых полуфабрикатов сплава типа BT1-0 ГОСТ 19807-91 с применением сварки, обеспечивающей получение заданного уровня герметичности корпусов кранов, производимых на ООО «Авиа-Сич»: дисковых DN15 и DN20 PN16 (ГОСТ 21345-2005), а также шаровых DN15 и DN20 PN16 (ТУ У 29.1-32638366-001:2005).

Экономический эффект от внедрения данной работы составил сто семдесят три тысячи грн., 00 коп. (173 тыс. грн., 00 коп.) при производстве 1000 корпусов кранов, из порошков ПТ5.

Расчет экономического эффекта на 1 корпус крана:

Наименование показателя на единицу продукта	Сумма, грн (по ранее применяемой технологии)	Сумма, грн (по разработанной технологии)
Сырье и основные материалы		
- порошок ПТ5		56
- сортовой пруток BT1-0	220	
Механическая обработка:		
- точение	23	7
- фрезерование	27	27
Сварка	-	12
Накладные расходы	20	15
ИТОГО (производственная себестоимость)	290	117
ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ		173

Председатель комиссии



В.Н. Николаев

Члены комиссии:



А.В. Овчинников

А.Е. Капустян

В.Я. Демочкин

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з НР та МД ЗНТУ,
проф.

В.В. Наумик

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор технічний
ТОВ «Запорізький титано-магнісвий
комбінат»

І.А. Сізіков

АКТ

впровадження науково-дослідної роботи

«10» березня 2016 р.

м. Запоріжжя

Комісія у складі:

Голова комісії: Начальник Технічного управління - Мішин В.А.;

Члени комісії:

Начальник Технічного відділу ТУ - Осипенко О.В.;

Начальник цеху №7 - Марченко М.В.;

Заступник начальника цеху №7 з виробництва магнію - Оверченко А.С.;

Заступник начальника цеху №7 з обладнання - Петров О.Г.;

Начальник відділення електролізу магнію цеху №7 - Кафідов О.В.;

Директор ПП «Віза-сервіс» - Смоляк Ю.В.;

Директор НДЦ «Титан Запоріжжя» ЗНТУ, д-р техн. наук - Овчинников О.В.;

Науковий співробітник НДЦ «Титан Запоріжжя» ЗНТУ - Капустян О.С.

Склала цей акт про наступне.

З 18 січня 2016 року по 28 лютого 2016 року на ТОВ "Запорізький титано-магнісвий комбінат" проводились дослідження виробів з титанового сплаву типу ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91), який отримано методом порошкової металургії із застосуванням зварювання.

В якості вихідного матеріалу використовували промислові порошки титанові (ТУ У 14-10-026-98) виробництва Запорізького металургійного дослідного заводу ДП «ДНДП Інститут титану».

Формоутворення заготовок для виробів проводили в ЗНТУ за таких параметрів: тиск пресування - понад 700 МПа, температура спікання - $1250 \pm 20^\circ \text{C}$; час спікання - 3 год. З'єднання заготовок проводили методом зварювання.

Виготовлення крану шарового DN20 PN16 по ГОСТ 21345-2005 було проведено на ПП «Віза-сервіс».

Після механічного оброблення дослідний кран шаровий був переданий на дослідно-промислові випробування до ТОВ "Запорізький титано-магнієвий комбінат".

Дослідно-промислове випробування проводилося на газоочисних спорудах цеху №7 в якості крану відбірника проб на баку скрубера першої ступені очистки в агресивному середовищі гіпохлориту кальцію $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ (відпрацьоване вапняне молоко) під напором, при температурі навколишнього середовища.

Після експлуатації дослідного титанового крану шарового із напрацюванням 1008 годин в середовищі гіпохлориту кальцію кран демонтовано і розібрано, а деталі піддані огляду та оцінці для визначення наявності та ступеню корозійного та абразивного зносу.

Комісія встановила:

В ході проведення дослідно-промислових випробувань після експлуатації на газоочисних спорудах цеху №7 в агресивному середовищі титанового крану шарового виробленого з дослідного матеріалу, що отримано за розробленою технологією встановлено, що кран працював в штатному режимі на протязі всього часу (1008 годин), складові частини дослідного крану (зварний корпус та сфера цільнометалева) не мали слідів корозії і абразивного зносу вище показників для сплавів ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91).

Вартість дослідного титанового крану виробництва ПП «Віза-сервіс» складає 740 грн/шт при вартості крана зі сталі X18H10T, що експлуатується в теперішній час - 1180 грн/шт. При впровадженні дослідних виробів на заміну існуючих за умови потреби ТОВ "Запорізький титано-магнієвий комбінат" 100 кранів на рік, економічний ефект може складати 44 000 грн. на рік. Даний ефект обумовлено тим, що дослідні титанові сплави отримані з порошку титану, виробленого підприємством України, що дозволяє знизити вартість сплавів, а також сприяє розвитку титанової промисловості в нашій країні.

В основу розробленої технології виробництва деталі, а саме реалізованого на ПП «Віза-сервіс» крану шарового DN20 PN16 по ГОСТ 21345-2005 із застосуванням методів порошкової металургії та зварювання покладено науково-практичні розробки, виконані в рамках дисертаційної роботи наукового співробітника НДЦ «Титан Запоріжжя» ЗНТУ Капустяна О.Є.

Комісія постановила:

Згідно з оцінкою стану деталей дослідного титанового крану шарового, на підставі проведених дослідно-промислових випробувань з оцінки корозійної та абразивної стійкості дослідного титанового крану шарового з титанового сплаву типу ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91), отриманого методом порошкової металургії із застосуванням зварювання, вважати доцільним використання розробленої технології для виготовлення деталей даного типу та рекомендувати її до впровадження на підприємстві.

Голова комісії:



В.А. Мішин

Члени комісії:



О.В. Осипенко



М.В. Марченко



А.Є. Оверченко



О.Г. Петров



О.В. Кафідов



Ю.В. Смоляк;



О.В. Овчинников



О.Є. Капустян

ДОДАТОК В

ЗАТВЕРДЖУЮ Проректор з НР та МД ЗНТУ, проф.  В.В. Наумик 2016 р	ЗАТВЕРДЖУЮ Головний інженер Запорізького державного підприємства “Кремнійполімер” Саліфов А.Ф. 
АКТ впровадження науково-дослідницької роботи	
«20» <u>січня</u> 2016 р.	м. Запоріжжя

Комісія у складі:

Голова комісії:	
Заступник головного інженера з енергозабезпечення	Помаз В.М.
Члени комісії:	
Головний механік	Сілін Є.С.;
Начальник цеху №13 (ремонтно-механічний цех)	Бідний Б.П.;
Начальник дільниці №4 “Нейтралізації і очищення промислових стічних вод”	Андросов П.П.;
Директор НДЦ “Титан Запоріжжя” ЗНТУ, д-р техн. наук	Овчинников О.В.;
Науковий співробітник НДЦ “Титан Запоріжжя” ЗНТУ	Капустян О.Є.

Склала акт про наступне, що на Запорізькому ДП “Кремнійполімер” на дільниці біохімічного очищення проводились дослідження виробів з титанових сплавів типу ВТ1-0 (ГОСТ 19807–91), які отримані методом порошкової металургії. Роботи проводили на прикладі втулки валу мулового насосу 28/2, розмірами: зовнішній діаметр 53 мм, внутрішній діаметр 32 мм, висота 37 мм.

Комісія постановила. Роботи проводились в умовах Запорізького ДП “Кремнійполімер” із застосуванням розробок НДЦ “Титан Запоріжжя” ЗНТУ. Було виготовлено втулку валу мулового насосу 28/2. Втулка впресована в титанове кільце насосу 28/2 і зварена з ним. Насос змонтований на дільниці біохімічного очищення. Дослідження проводили з 08.01.2015 по 30.03.2015.

Після експлуатації деталі в робочому лужно-кислому середовищі із напрацюванням 1000 годин насос демонтовано і розібрано, а дефекти деталі піддані оцінці.

Згідно з оцінкою стану деталі комісія постановила:

- деталь, що досліджувалась після відпрацювання 1000 годин не мала слідів корозії і зносу вище нормованих показників для раніше застосованої деталі з деформованого титанового сплаву BT1-0;
- зварювання дослідної втулки проводилось без погіршень процесу, а місце шву не мало жодних видимих відмінностей від шву з деформованого титану BT1-0, що застосовувався раніше;
- виготовлення втулки валу мулового насосу 28/2 за дослідною технологією, що розроблена в НДЦ “Титан Запоріжжя” ЗНТУ забезпечила зниження втрати матеріалу до 93 %;
- на підставі проведених оціночних робіт зроблено висновок про доцільність використання досліджуваного методу виготовлення і монтажу деталей;
- в основі досліджуваного методу виробництва деталі із застосуванням зварювання для її монтажу лежать науково-практичні розробки виконаних в рамках дисертаційної роботи наукового співробітника НДЦ “Титан Запоріжжя” ЗНТУ, Капустяна О.Є.

Голова комісії

Заступник головного інженера
з енергозабезпечення

В.М. Помаз

Члени комісії:

Головний механік

Начальник цеху №13

(ремонтно-механічний цех)

Начальник дільниці №4 “Нейтралізації і
очищення промислових стічних вод”

Директор НДЦ “Титан Запоріжжя” ЗНТУ,

д-р техн. наук, професор

Науковий співробітник

НДЦ “Титан Запоріжжя” ЗНТУ

Є.С. Сілін

Б.П. Бідний

П.П. Андросов

О.В. Овчинников

О.Є. Капустян

ДОДАТОК Г

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з НР та МД ЗНТУ,
проф.В.В. Наумик
2018р

ЗАТВЕРДЖУЮ

Генеральний директор
ДП «ДНДП Інститут титану»
М.В. Хазнаферов
05.02.2015

АКТ

**впровадження науково-дослідних робіт
щодо дослідження виробів з титанових сплавів типу VT1-0 (ГОСТ 19807-91),
отриманих методом порошкової металургії із застосуванням зварювання**

Комісія у складі:

Голова комісії: учений секретар – Сокол Л.В.

члени комісії:

Зав. лабораторією № 20 – Звонова Н.І.

Директор ЦСВМіАК – к.х.н. Пряхіна В.М.

Зав. лабораторією № 2 – Сидоренко С.А.

Зав. лабораторією № 3 – Янко Т.Б.

Головний інженер ЗМДЗ – к.т.н. Павлов В.В.

Директор НДЦ «Титан Запоріжжя» ЗНТУ – д.т.н., професор Овчинников О.В.

Н.с. НДЦ «Титан Запоріжжя» ЗНТУ – Капустян О.Є.

склала цей акт про те, що в період з 08.01.2015 р. по 30.01.2015 р. на ДП «ДНДП Інститут титану» проводилися науково-дослідні роботи щодо дослідження виробів з титанових сплавів типу VT1-0 (ГОСТ 19807-91), отриманих методом порошкової металургії із застосуванням зварювання.

В якості вихідного матеріалу використовували промислові порошки титанові (ТУ У 14-10-026-98) виробництва Запорізького металургійного дослідно-промислового заводу ДП «ДНДП Інститут титану».

Формоутворення заготовок для виробів проводили в ЗНТУ за таких параметрів: тиск пресування - понад 700 МПа, температура пресування - $1250 \pm 20^\circ \text{C}$; час пресування - 3 год. Крупність порошоків складала 0,32-0,45 мм.

Після цього заготовки були виготовлені методом зварювання у твердій фазі, механічно оброблені для набуття кінцевого вигляду деталі (корпуса крану діаметром 20 мм та висотою 65 мм) та передані на дослідження.

В основу розробленої технології виробництва деталі із застосуванням методів порошкової металургії та зварювання покладено науково-практичні розробки, виконані в рамках дисертаційної роботи наукового співробітника НДЦ «Титан Запоріжжя» ЗНТУ Капустяна О.Є.

Комісія встановила, що в ході проведення науково-дослідних робіт після експлуатації із напрацюванням 170 годин в агресивних середовищах 32-% HNO_3 , 10-% H_2SO_4 , 20-% HCl в протоці при кімнатній температурі корозійна стійкість матеріалу, що отримано за розробленою технологією, практично не поступається раніше використовуваному деформованому сплаву BT1-0.

ПОСТАНОВИЛИ:

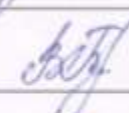
На підставі проведених науково-дослідних робіт з оцінки корозійної стійкості виробів з титанових сплавів типу BT1-0 (ГОСТ 19807-91), отриманих методом порошкової металургії із застосуванням зварювання, вважати доцільним використання розробленої технології для виготовлення довгомірних напівфабрикатів та деталей та рекомендувати її до впровадження. Планується як доповнення до ТУ У 27.4-00201081-001-2003 «Елементи фільтрувальні з титану».

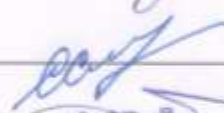
Голова комісії:

 Л.В. Сокол

Члени комісії:

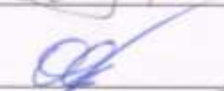
 Н.І. Звонова

 В.М. Пряхіна

 С.А. Сидоренко

 Т.Б. Янко

 В.В. Павлов

 О.В. Овчинников

 О.Є. Капустян

ДОДАТОК Д

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з НР та МД ЗНТУ,
проф.



В.В. Наумик
2018 р

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник голови ради директорів,
технічний директор
АТ «Мотор Січ», канд. техн. наук



П.Д. Жеманюк
2018 р.

ВИСНОВОК

АТ «Мотор Січ» щодо практичної цінності дисертаційної роботи
Капустяна О.Є.

Дисертаційна робота старшого викладача кафедри обладнання та технології зварювального виробництва Запорізького національного технічного університету Капустяна О.Є. присвячена питанням імпортозаміщення напівфабрикатів з титанових сплавів.

Здобувач розробив технологію отримання пруткових напівфабрикатів Ø 6...50 мм титанових сплавів типу ВТ1-0 и ВТ6 методами порошкової металургії та зварювання. В якості вихідного матеріалу використовували промисловий порошок титану марки ПТ5 (ТУ 14-10-026-98) виробництва ДП «Державний науково-дослідний і проектний інститут титану», ДП «Запорізький металургійний дослідно-промисловий завод». Встановлено, що хімічний склад пруткових напівфабрикатів відповідає ГОСТ 19807-91; а показники їх механічних властивостей близькі до рівня литих сплавів того ж складу. Після деформаційної обробки рівень механічних властивостей зварного з'єднання спечених титанових сплавів знаходиться на рівні механічних властивостей деформованих напівфабрикатів (ГОСТ 26492-85). Механічні властивості зварного шва спечених титанових сплавів співмірні з основним металом. Дослідні титанові сплави отримані з сировини (порошок титану), виробленій на території України. Це дозволяє знизити вартість сплавів до 50 %, а також сприяє розвитку титанової промисловості в нашій країні.

Прутки, отримані за розробленою технологією мають практичну цінність для загального машинобудування. У теперішній час із порошкових матеріалів на АТ «Мотор Січ» виготовляється ряд виробів, що використовують в конструкції ГТД. Тому використання титанових сплавів в цій галузі не вимагає великого обсягу дослідних робіт та випробувань на реальних виробках, виходячи з цього напівфабрикати можуть з мінімальними витратами впроваджуватися в серійне виробництво.

Робота представляє великий науковий і практичний інтерес і може бути впроваджена в практику серійного виробництва, в тому числі в авіаційній промисловості. Запропоновані технології з отримання зварних пруткових напівфабрикатів титанових сплавів стосуються актуальних питань імпортозаміщення та зниження вартості продукції, що виробляється на основі титану. Титанові сплави широко застосовують в конструкціях газотурбінних двигунів. Тому вказана технологія, що дозволить замінити зарубіжні аналоги матеріалів вітчизняними, буде сприяти підвищенню конкурентоздатності нашої продукції. При отриманні позитивних результатів атестаційних заходів проведених у відповідності з вимогами, що пред'являються до авіаційних матеріалів, АТ «Мотор Січ» буде зацікавлена в використанні цієї технології у власному виробництві.

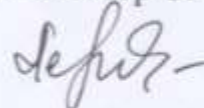
Головний металург АТ «Мотор Січ»



В.В. Ключінін

Зав. бюро порошкової металургії АТ «Мотор Січ»

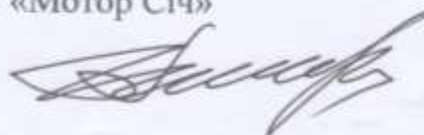
канд. техн. наук



З.В. Леховіцер

Головний зварювальник АТ «Мотор Січ»

канд. техн. наук



І.А. Петрик

ДОДАТОК Е

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Проректор з НР та МД ЗНТУ
 посада керівника / назва організації (підприємства)
 В.В. Наумик
 ПІБ
 24 06 2018 р.


 М.П.
 АКТ
 впровадження результатів НДР

24 05 2018 р. м. Запоріжжя

Складено комісією у складі:

Голови зав. каф. «Обладнання та технології зварювального виробництва»,
д-ра техн. наук, проф. Овчинникова О.В.

члени комісії: доц. каф. «Обладнання та технології зварювального виробництва»,
канд. техн. наук Куликовський Р.А.;

доц. каф. «Обладнання та технології зварювального виробництва»,
канд. техн. наук Осіпов М.Ю.;

проф. каф. «Обладнання та технології зварювального виробництва»,
канд. техн. наук Нетребко В.В.

Комісія провела роботу по визначенню фактичного впровадження дисертаційної роботи старшого викл. каф. «Обладнання та технології зварювального виробництва» Капустяна Олексія Євгеновича «Підвищення механічних і службових властивостей зварних з'єднань спеченого конструкційного титану», затвердженої протоколом № 4 Науково-технічної ради ЗНТУ від 16.03.2016 р.

Вид та об'єм впровадження: закономірності формування геометрії і структури зварних з'єднань спечених титанових сплавів, отриманих методами зварювання тиском (контактним стиковим оплавленням, конвекційним тертям і тертям перемішуванням) впроваджені в лекційний курс «Спеціальні методи зварювання тиском», залежність якості зварних з'єднань від параметрів режиму

зварювання в лабораторні роботи дисципліни «Спеціальні методи зварювання тиском»; дослідні дані корозійних властивостей зварних з'єднань титану, синтезованого методом порошкової металургії в лекційний курс дисципліни «Теорія процесів зварювання»; технологія отримання зварних з'єднань заготовок спечених титанових сплавів, в лекційний та практичний курс дисципліни «Зварювання різномірних і композитних матеріалів». Досягнуті технічні результати, їх рівень – підвищення якості підготовки студентів спеціальності 131 Прикладна механіка.

Голова комісії


підпис

О. В. Овчинников

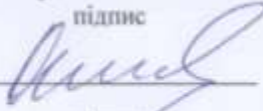
(П.І.Б.)

Члени комісії


підпис

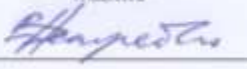
Р. А. Куликовський

(П.І.Б.)


підпис

М.ІУ. Осіпов

(П.І.Б.)


підпис

В.В. Нетребко

(П.І.Б.)

ДОДАТОК Ж

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті без співавторів у наукових фахових виданнях України

1. Капустян А. Е. Получение длинномерных полуфабрикатов из спеченных титановых сплавов сваркой трением. *Автоматическая сварка*. 2015. № 3–4. С. 55–59.

Статті у виданнях з індексом цитування

2. Капустян О. Є., Овчинников О. В., Янко Т. Б. Спечені титанові сплави для ядерної енергетики. *Питання атомної науки і техніки*. Серія «Вакуум, чисті матеріали, надпровідники». 2018. № 1 (113). С. 134–141. [НБД Scopus, Web of Science].

3. Овчинников А. В., Капустян А. Е., Давыдов С. И., Павлов В. В. Ресурсосберегающая технология получения длинномерных полуфабрикатов из титановых сплавов методом порошковой металлургии. *Технологические системы*. 2013. № 4 (65). С. 29–33. [НБД Open Academic Journals Index, Index Copernicus, Scientific Indexing Services, International Institute of Organized Research (I2OR), CiteFactor, Eurasian Scientific Journal Index, General Impact Factor, Directory of Indexing and Impact Factor, International Innovative Journal Impact Factor, ResearchBib, eLIBRARY].

Статті у наукових фахових виданнях України

4. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Павлов В. В., Шульга К. С. Интегрированная технология получения полуфабрикатов из титановых сплавов на основе методов порошковой металлургии и сварки. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2014. № 2. С. 93–95. [НБД Ulrich's Periodical Directory, ВІНІТІ].

5. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Вакуленко И. А. Получение сварных изделий из спеченных титановых сплавов. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2014. № 3 (51). С. 84–91. [НБД Index Copernicus, Google Scholar, Global Impact Factor, InfoBase Index].

6. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Коваленко Т. А., Шевченко А. В. Получение полуфабрикатов титановых сплавов для авиационно-космической техники. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2016. № 7 (134). С. 107–116. [НБД eLIBRARY; Index Copernicus; CiteFactor; AcademicKeys; Infobase Index; WordCat; Google Scholar]

7. Скребцов А. А., Овчинников А. В., Капустян А. Е. Исследование механических свойств сварных соединений спеченных титановых сплавов. *Вісник СевНТУ*. Серія: Механіка, енергетика, екологія: Збірник наук. праць. Севастополь: СевНТУ, 2012. Випуск 132. С. 14–17. [НБД РИНЦ, eLIBRARY, Ulrich's Periodicals Directory, ВІНІТІ РАН]

8. Скребцов А. А., Овчинников А. В., Капустян А. Е., Быков И. О., Селиверстов А. Г. Исследование структуры сварных соединений спеченных титановых сплавов. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов*. Дн-вск: ПГАСА, 2012. Вып. 64, С. 403–408.

9. Скребцов А. А., Овчинников А. В., Шевченко В. Г., Капустян А. Е., Джуган А. А. Влияние содержания гидрированного титана в смеси порошков на механические свойства спеченного сплава BT1-0. *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов*. Дн-вск: ПГАСА, 2014. Вып. 73, ч. 4. С. 89–94.

10. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Павлов В. В., Шульга К. С., Шевченко В. Г. Влияние режимов прессования и спекания на пористость спеченных титановых изделий. *Обработка материалов давлением: Сб. науч. трудов*. Краматорск: ДГМА, 2015. № 2 (41). С. 221–225.

Патент на корисну модель

11. Гідрид титану губчастого, легований киснем / С. Б. Беліков, С. І. Давидов, О. М. Івасишин, О. В. Овчинников, В. Г. Шевченко, О. В. Осипенко, О. Є. Капустян, І. О. Биков, Д. Г. Саввакін: пат. 74771 Україна, МПК (2012.01) C01B 6/00. заявл. 23.04.2012; опубл. 12.11.2012, Бюл. №21. 4 с.

Тези в матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій

12. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Осипенко А. В. Ресурсосберегающая технология получения полуфабрикатов из титановых сплавов серии low-cost.

Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок: Тезисы докладов X Международной научно-технической конференции (Алушта, 23–28 сентября 2013). Запорожье: АО «Мотор Сич», 2013. С. 10–12.

13. Капустян А. Е., Овчинников А. В., Коваленко Т. А., Шевченко А. В. Получение полуфабрикатов титановых сплавов для авиационно-космической техники. *XX Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей.* (Коблево, 5–10 вересня, 2016). Харків: Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», 2016. С. 83.

14. Капустян О. Є., Акритова Т. О., Савонов Ю. М. Отримання довгомірних пруткових заготовок з титану методами порошкової металургії. *Титан–2016: виробництво та використання в авіабудуванні: Збірник тез доповідей IV Міжнар. наук.-практ. конф.* (Запоріжжя, 3–4 листопада 2016). Запоріжжя: АТ «Мотор Січ», 2016. С. 52–54.

15. Суцїнський О. Д., Овчинников О. В.; Капустян О. Є., Янко Т. Б., Акритова Т. О. Спечені титанові сплави для ядерної енергетики. *Высокочистые материалы: получение применение, свойства: Матеріали доповідей 4-ї Міжнародної конференції* (Харків, 12–15 вересня 2017). Харків: ННЦ ХФТИ, 2017. С. 87.

16. Акритова Т. О., Овчинников О. В., Капустян О. Є. О необхідності дослідження корозійної тривкості зварних швів спеченого титану. *Людина і Космос: Тези доп. XX Міжнар. молодіжної наук.-практ. конф.* (Дніпро, 11–13 квітня 2018). Дніпро, 2018. С. 235.

17. Капустян О.Є., Ніколаєв В.М., Овчинников О.В. Розширення сфери застосування титанових сплавів. *Титан 2018: виробництво та використання в Україні: Збірник доп. міжнар. конф.* / Під ред. проф. С.В. Ахоніна. (Київ, 11–13 червня 2018). К.: ТОВ «ДИА», 2018. С. 71–73.

ДОДАТОК И

ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались здобувачем та обговорювались на наступних конференціях:

- XXII Міжнародній науково-технічній конференції «Стародубовські читання», Дніпропетровськ 19–20 квітня 2012 року, участь з доповіддю;
- X Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології життєвого циклу авіаційних двигунів і енергетичних установок», Алушта, 23–28 вересня 2013 року, участь з доповіддю;
- XXIV Міжнародній науково-технічній конференції «Стародубовські читання», Дніпропетровськ, 17–18 квітня 2014 року, участь з доповіддю;
- XXI Міжнародному конгресі двигунобудівників, Коблево, 5–10 вересня, 2016 року, тези та її доповідь подано дистанційно;
- IV Міжнародній науково-практичній конференції «Титан–2016: Производство и применение в авиастроении», Запоріжжя, 3–4 листопада 2016 року, участь з доповіддю;
- Науково-практичній конференції «Тиждень науки», Запоріжжя, 18 – 21 квітня 2017 року, участь з доповіддю;
- IV Міжнародній конференції «Высокочистые материалы: получение применение, свойства», Харків, 12–15 вересня 2017 року, тези та її доповідь подано дистанційно;
- XX Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Людина і космос» 11–13 квітня 2018 року, тези та її доповідь подано дистанційно;
- Міжнародній конференції «Титан 2018: виробництво та використання в Україні, Київ, 11–13 червня 2018 року, тези та її доповідь подано дистанційно.