

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

ГРУЗИН НАТАЛІЯ ВЯЧЕСЛАВІВНА



УДК 669.017.548.735.6

**ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ, ТЕКСТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРУБ
У СПЛАВАХ ТИТАНА НА РІЗНИХ СТАДІЯХ ВИРОБНИЦТВА**

05.02.01 – матеріалознавство

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, лауреат
Державної премії України в галузі науки і техніки
Вахрушева Віра Сергіївна,
Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»,
професор кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Овчинников Олександр Володимирович**, в.о.
завідувача кафедри обладнання та технологія зварювального виробництва
Національного університету «Запорізька політехніка»;

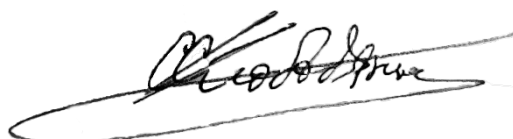
доктор технічних наук, професор **Сухова Олена Вікторівна**, професор кафедри
експериментальної фізики Дніпровського національного університету імені Олеся
Гончара.

Захист відбудеться 23 квітня 2021р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої
ради Д 08.085.02 при Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська
державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49600, м. Дніпро, вул.
Чернишевського, 24-а.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного вищого навчального
закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за
адресою: 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24-а та на сайті <http://pgasa.dp.ua/>

Автореферат розіслано “ 22 ” березня 2021р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 08.085.02 д.т.н., професор



С. О. Слободянюк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Труби з титанових сплавів мають широке застосування як конструкційний матеріал у сучасному авіабудуванні, аерокосмічній техніці та в інших пріоритетних галузях промисловості. В гідравлічних системах сучасних цивільних і військових літаків використовують безшовні труби із титанового сплаву Ti-3Al-2,5V. На цей час основними споживачами таких труб є фірми “Boeing” і “Airbus”. Застосування титану і виробів з нього в останній час значно розширилося завдяки їх відмінним характеристикам питомої міцності, термостійкості, корозійної стійкості в поєднанні з екологічними показниками та технологічними властивостями.

В останні роки споживачами висуваються нові високі вимоги до труб з титанових сплавів, зокрема, до їх текстури, які відображені у відповідних стандартах. Раніше вимоги до текстури труб у нормативній документації були відсутні. Для збільшення ресурсу експлуатації труб, крім забезпечення вимог до регламентованої текстури, необхідне певне поєднання їх механічних і структурних характеристик.

Відомо, що титан є анізотропним матеріалом, що зумовлено його гексагональною щільноупакованою (ГЩУ) кристалографічною решіткою. Останнім часом спостерігається підвищення інтересу до проблем керування анізотропією структури і властивостей матеріалів і у зв'язку з цим до проблем текстуроутворення у процесі їх виготовлення. Крім зазначених вище вимог, титанові труби повинні бути технологічними та витримувати випробування на роздачу, загин і сплющування, що відображено у технічних вимогах до них. У зв'язку з викладеним, в даній роботі досліджувалося питання отримання та поєднання необхідних властивостей в технологічному процесі виготовлення труб, особливо тих операцій, які впливають на експлуатаційні характеристики готової продукції.

Аналіз літератури показав, що надійність труб з титану і його сплавів багато в чому визначається кристалографічною текстурою, яка формується при виготовленні труб, та сприяє отриманню заданої анізотропії механічних властивостей, що є ефективним способом підвищення експлуатаційних характеристик елементів виготовлених з них конструкцій. На основі текстурних даних можна розрахувати або прогнозувати цілу низку тензорних характеристик таких, як: коефіцієнт термічного розширення, механічні властивості, а також коефіцієнти теплопровідності, електроопору та інші. Для альфа сплавів титану ефективним способом підвищення експлуатаційних характеристик елементів конструкцій є створення у них заданої анізотропії механічних властивостей.

Створення певного типу текстур у виробництві труб з титану є новим завданням для трубної галузі, вирішення якої потребує проведення систематичних наукових, експериментальних і технологічних досліджень. Для українських заводів, виробників титанових труб, це є досить актуальною задачею. Тим більше, що треба поєднати створення певних типів структури, властивостей та текстури, а також технологічних властивостей титанових труб.

Таким чином, дисертаційна робота, яка спрямована на розвиток наукових основ формування структури, властивостей і текстури в технологічному процесі виготовлення труб із сплавів титану та розробка і впровадження відповідних рекомендацій з підвищення їх якісних характеристик у промислових умовах, є актуальною і сприяє вирішенню важливої науково-практичної задачі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язане з тематичними планами наукових досліджень Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». Авторка була виконавцем низки договірних науково-дослідних робіт: «Оцінка кристалографічної текстури труб із сплаву титану в залежності від технології виробництва» (договір № 618 від 03. 01. 2014 р.); «Вплив схеми деформованого стану титанового сплаву на формування текстури труб» (дог. № 2016/55 (924) від 24. 03. 2016 р.); «Оцінка впливу параметрів технологічного процесу виготовлення труб із сплаву титану на формування структури, кристалографічної текстури, механічних властивостей та розробки і надання рекомендацій щодо уточнення параметрів технологічного процесу» (дог. № 449/243 2019 від 10. 10. 2019 р.), а також держбюджетної теми кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів: «Розробка інноваційних технологій виробництва низьколегованих сталей з використанням нанодисперсних модифікаторів на металургійних підприємствах України» (2018–2020 р.р., № держреєстрації 0118U10033).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є встановлення закономірностей формування структури, властивостей та текстури на всіх етапах технологічного процесу виготовлення труб із титанового сплаву і розроблення деформаційно-термічних параметрів процесу для забезпечення необхідного комплексу властивостей в умовах виробництва.

Для досягнення цієї мети було поставлено та вирішено такі задачі:

- проаналізувати умови експлуатації та вимоги до труб зі сплавів титану для гідросистем літаків, а також сучасний стан виробництва труб з титанових сплавів;
- дослідити процеси формування структури, механічних властивостей та текстури на всіх технологічних етапах виробництва труб: гарячому пресуванні, виготовленні ТРЕХ (Tube Rolling Extrusion)-труб, на холодному переділі та термічної обробки;
- простежити формування текстури труб та її спадковості на всіх технологічних етапах виготовлення труб;
- виконати порівняльний аналіз комплексу властивостей гарячопресованої заготовки від двох різних виробників і зробити рекомендації;
- розробити режими деформаційно-термічної обробки на стадії холодного деформування для одержання максимальної кількості радіальної складової текстури;
- встановити вплив рівня механічних властивостей на коефіцієнт відносного стиснення (KBC, CSR – Contractile Strain Ratio);
- встановити взаємозв'язок між коефіцієнтом відносного стиснення та співвідношенням обтиску труби по стінці і діаметру (коефіцієнт Q);
- визначити можливість гартування пресованих труб та оцінити вплив різних видів термічної обробки на наявність залишкових напружень і показників коефіцієнта відносного стиснення;
- розробити рекомендації та здійснити їх впровадження на заводах–виробниках труб з удосконаленням технологічного процесу виробництва труб із сплаву титану Ti–3Al–2,5V для забезпечення вимог нормативної документації;

- впровадити наукові та практичні результати роботи в навчальний процес на кафедрі матеріалознавства та обробки матеріалів в ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури».

Об'єкт дослідження – процеси формування структури, властивостей і текстури при виготовленні труб зі сплаву титану $Ti-3Al-2,5V$ для гідравлічних систем літаків.

Предмет дослідження – закономірності процесів формування структури, властивостей і текстури на всіх етапах виготовлення труб зі сплаву титану $Ti-3Al-2,5V$.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження роботи базуються на фундаментальних положеннях матеріалознавства, фізики твердого тіла, термічної і деформаційної обробки металів. Для досягнення мети дисертаційної роботи використано сучасні методи: металографічний, рентгеноструктурний аналізи, оцінка параметрів Кернса, растрова електронна мікроскопія, визначення коефіцієнтів відносного стиснення та залишкових напружень, а також стандартні методи: механічні випробування, вимірювання твердості; оцінка технологічних властивостей труб шляхом випробування на сплющування, роздачу, загин.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Отримано подальший розвиток уявлення про закономірності формування структури, властивостей і текстури на різних етапах виготовлення труб зі сплаву $Ti-3Al-2,5V$.

Формування структури, властивостей і різних типів текстури, а саме, радіальної та тангенціальної впливають на характер зміцнення і технологічні властивості труб. Раніше такі дослідження були проведені тільки на стадії гарячого деформування шляхом пресування. Систематичні дослідження формування структури, властивостей, текстури, її спадковості для сплаву титану $Ti-3Al-2,5V$ під час усього процесу виготовлення титанових труб від заготовки до готової труби раніше не проводилися.

2. Вперше експериментально встановлено та одержано кількісну оцінку, із застосуванням параметрів Кернса, текстурні характеристики (кількості складових радіальної та тангенціальної текстури) труб з титанового сплаву на всіх етапах трубного виробництва: у трубній заготовці, після гарячої деформації пресуванням та на різних етапах подальшої холодної деформації, а також після термічної обробки.

Раніше такі дані не були відомі. Встановлено, що трубна заготовка після кування та пресування текстурована і має як радіальну, так і тангенціальну складову текстури (37...45 % і 48...52 % відповідно). Простежується спадковість вихідної текстури. Подальша холодна деформація збільшує вміст радіальної текстури на 5...10 %. Важливим фактором при цьому є загальний ступінь деформації та розподіл деформації по стінці та діаметру труби. Встановлено, що термічна обробка практично не змінює текстури труб.

3. Вперше встановлено зв'язок між параметрами деформації: загальним ступенем деформації і співвідношенням обтиску по стінці і діаметру труби (коефіцієнт Q) та коефіцієнтами відносного стиснення і параметрами текстури.

Раніше такі дані не були відомі. Це дозволило уточнити режими холодної деформації труб: рекомендовано на останніх проходах холодної прокатки збільшити загальний ступінь деформації до 80...85 % і переважну деформацію здійснювати по

товщині стінки, що дозволить активізувати процеси двійникування. Доведено, що коефіцієнт Q має бути не менш 3; при цьому збільшується кількість радіальної складової текстури до 65...70 %, що забезпечує рівень механічних, технологічних властивостей і величину коефіцієнту відносного стиснення труб відповідно до підвищених вимог нормативних документів і споживачів.

4. Вперше встановлено оптимальне значення коефіцієнту відносного стиснення, що характеризує текстуру при виготовленні труб із сплаву титану Ti-3Al-2,5V.

Показано, що коефіцієнт відносного стиснення 1,3...3,5, визначений у нормативній документації, не завжди забезпечує необхідний комплекс властивостей, як механічних, так і особливо технологічних. Оптимальним коефіцієнтом відносного стиснення, що характеризує текстуру при виготовленні труб, є 1,5...2,5. За більш високих його показниках ряд труб не витримують технологічні випробування, а також мають більш високий, у порівнянні з вимогами, рівень механічних властивостей.

5. Доведено, що відпал холоднодеформованих труб із сплаву титану Ti-3Al-2,5V, який проводять для зняття залишкових напружень (стан CWSR – Cold Worked Stress Relieved), не впливає на зміну їх текстури.

Для подальшої роботи з трубами для виготовлення вузлів гідросистем літаків потрібна термічна обробка. Вибрано режим CWSR для зберігання властивостей і текстури, які забезпечують експлуатаційні властивості.

Практичне значення одержаних результатів. На основі виконаних у роботі досліджень, аналізу отриманих результатів та їх наукового обґрунтування розроблено та запропоновано рекомендації для промислового виробництва труб зі сплаву титану Ti-3Al-2,5V (Grade 9):

- запропоновано параметри гарячої деформації, а саме зниження температури та швидкості процесу пресування, що забезпечують підвищення однорідності структури сплаву по товщині стінки та довжині труб;

- розроблено пропозиції по зміні деформаційних режимів при холодній прокатці труб: збільшення загальних ступенів деформації, особливо на останніх проходах, до 80...85 % та досягнення показників коефіцієнту відносного стиснення (1,3...2,5), що забезпечується створенням радіальної складової текстури в трубах на рівні 60...70 %;

- встановлено, що для створення переважно радіальної текстури труб, коефіцієнт Q повинен бути не нижче 3. Рекомендовано на останніх проходах прокатки труб використовувати стани КРВ для збільшення деформації по стінці;

- встановлена можливість гартування труб зі сплавів титану Ti-3Al-2,5V (Grade 9) і ПТ – 1М після пресування;

- на підставі отриманих результатів з застосуванням рекомендацій удосконалена технологія та прокатані труби, що відповідають вимогам стандартів;

- впроваджено рекомендації з удосконалення технологічного процесу в промислових умовах при виготовленні труб з титанових сплавів на Виробничому Об'єднанні «ОСКАР» (ТОВ ВО «ОСКАР»), м. Дніпро і м. Нікополь, що підтверджено відповідним актом впровадження від 11. 11. 2019 р.;

- результати роботи впроваджено у навчальний процес на кафедрі матеріалознавства та обробки матеріалів ДВНЗ ПДАБА при вивченні дисциплін: «Кольорові метали та сплави», «Недосконалість кристалічних решіток та фізика міцності» та «Фізичні властивості і методи дослідження матеріалів», акт впровадження від 12. 01. 2021 р.

Достовірність результатів роботи. Високий ступінь достовірності та обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, викладених у дисертації, забезпечується: використанням в експериментальних дослідженнях сучасних методів дослідження, сертифікованого лабораторного обладнання і устаткування, достатньою статистичною кількістю досліджених зразків і високою збіжністю результатів випробувань; результатами промислового виготовлення партій труб зі сплаву титану Ti-3Al-2,5V (Grade 9) з використанням розроблених у роботі рекомендацій, та відповідності якості виготовлених труб технічним вимогам.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи одержано дисертантом самостійно. Аналітичний огляд, постановка мети і задач дослідження, проведення експериментів у лабораторних і промислових умовах, обробка, аналіз і наукове обґрунтування отриманих результатів виконані особисто автором. При проведенні досліджень, результати яких опубліковані у співавторстві, автору належить розробка основних теоретичних положень та лабораторних експериментів [2, 4, 11, 15]; проведення лабораторних досліджень та спостережень [3, 5, 10, 12, 13].

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових та експериментальних досліджень, що були покладені в основу дисертаційної роботи апробовані в доповідях на міжнародних конференціях: XII міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос. Випереджаючи час», 2010 р., м. Дніпропетровськ; XI міжнародна конференція «Стратегія якості в промисловості та освіти» 2015 р., Дніпропетровськ – Варна (Болгарія); XVIII міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос. Випереджаючи час», 2016 р., м. Дніпропетровськ; IV міжнародна науково-практична конференція «ТИТАН 2016: виробництво та використання в авіабудуванні», 2016 р., м. Запоріжжя; XIII Міжнародна конференція «Стратегія якості в промисловості та освіти» 2017 р., м. Варна, (Болгарія); XIX міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос. Випереджаючи час», 2017 р., м. Дніпро.

Публікації. Основні положення та результати дисертації опубліковані в 15 наукових працях, у тому числі 9 статей – у наукових фахових виданнях України (1 – одноосібно [9], 2 – у виданнях, що включені до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS [6, 8]; 1 стаття у зарубіжному виданні [8]); 6 – тези доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 135 найменувань та 3 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 160 сторінок, у тому числі 111 сторінок основного тексту, 55 рисунків і 23 таблиці.

Автор висловлює щире подяку за проведення спільних досліджень і допомогу канд. фіз.-мат. наук Малихіну Д.Г.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано доцільність та актуальність теми дисертації, сутність науково – прикладної задачі, яка вирішується в роботі, сформульована мета і задачі, об'єкт і предмет досліджень, а також наукова новизна, практична цінність і достовірність отриманих результатів. Відображено особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію і публікації результатів дисертаційної роботи, а також структуру і обсяг дисертації.

У першому розділі представлено аналіз літературних джерел з тематики:

- титан та особливості його кристалічної решітки, що впливають на механізми деформування та структуроутворення;
- розглянуто вплив легуючих хімічних елементів на склад та структуру титану;
- проаналізовано сучасні технології виготовлення труб з титану та його сплавів;
- особливості структури, властивостей і текстури труб з титану та його сплавів і шляхи досягнення комплексу властивостей для підвищення їх експлуатаційних можливостей, особливо втомних характеристик.

Відзначено вагомий внесок у розвиток теорії механізмів деформування і структуроутворення титану та його сплавів шкіл таких вчених, як: Б.А. Колачев, А.А. Бабареко, Ю.А. Перлович, Я.Д. Вишняков, А.А. Брюханов, С. Я. Бецофен.

Аналіз літератури показав недостатність матеріалів, щодо принципів деформування титану та його сплавів у виготовленні труб. Як правило, у літературі розглянуті процеси деформування та формування текстур у листах. Разом з тим, схема напруженого стану прокатки труб значно відрізняється від схеми прокатки листа, що може впливати на процеси формування текстури під час прокатки труб. Додатковим резервом поліпшення властивостей труб з титану є створення спеціальних видів текстури, а саме радіальної текстури, що забезпечує потрібну конструкторам анізотропію властивостей. Нові вимоги до труб гідравлічних систем літаків потребують нових підходів до технологічного процесу їх виготовлення.

У другому розділі розглянуто матеріали, методи, методики і обладнання для проведення досліджень.

Основним матеріалом досліджень був сплав титану Ti–3Al–2,5V (Grade 9), який широко використовується як конструкційний матеріал у трубах гідравлічних систем літаків, а також сплав титану ПТ–1М, який використовується як конструкційний матеріал у різних галузях. Хімічний склад наведений у таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад досліджуваних сплавів титану

Досліджувані сплави	Масова частка елементів, %										
	C	H	Fe	O	Al	V	N	Ti	Si	Zr	Інші домішки
Grade 9	0,08	0,015	0,25	0,15	2,5- 3,5	2,0-3,0	0,03	осн.	-	-	0,5
ПТ-1М	0,07	0,006	0,2	0,12	0,2-0,7	-	0,04	осн.	0,1	0,3	0,4

Труби, які досліджені у роботі, різних розмірів і виготовлені згідно схеми: кування → гаряче пресування у $\alpha+\beta$ області, або β -області; холодна прокатка (одна

або дві) для виготовлення TREX-труб → термічна обробка → серія холодних прокаток з проміжними термічними обробками та кінцевою термічною обробкою відпалом для зняття напружень, згідно зі стандартом AMS 4945 стан CWSR (холодна деформація і подальший відпал для зняття напружень).

У роботі використані сучасні методи дослідження: металографічний і рентгеноструктурний аналізи, растрова електрона мікроскопія, методи вимірювання коефіцієнту відносного стиснення, твердості та комплексу механічних і технологічних властивостей, а також оцінка залишкових напружень. Рентгеноструктурний аналіз був використаний для дослідження кристалографічної текстури труб, побудови зворотних полюсних фігур (ЗПФ).

Основною характеристикою при цьому аналізі є текстурний параметр Кернса (f). Це характеристика спрямованості базисних нормалей гексагональної щільноупакованої решітки (ГЦУ) – решітки матеріалу, осей «С» кристалографічної решітки зерен уздовж заданого напрямку виробу f :

$$f_j = (\cos^2 \alpha_{ji}), \quad (1)$$

де: α_{ji} – кут між осями «С» (з безліч і-х орієнтацій) та напрямком j .

Підготовка зразків для дослідження полягала у розрізуванні труб на сегменти і виготовлення складених зразків як показано на рисунку 1.

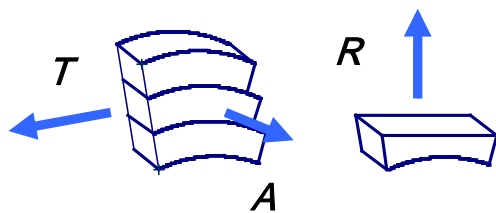


Рисунок 1 – Ілюстрація проєкцій зйомок

Зразки шліфували, полірували і стравлювали зовнішній шар. Зйомку проводили у двох напрямках T , R .

Для визначення кристалографічної текстури труб використовували метод рентгеноструктурного аналізу на установці ДРОН-4 в опроміюванні $\text{CuK}\alpha$. Записували повнопрофільну діаграму 2θ умовних змін інтенсивності рентгенівського відображення від зовнішньої поверхні труб (R) і від площини повздовжнього перетину (T). Для кожної зйомки визначали інтенсивності рентгенівських ліній і щільність полюсів P_i за методом Харріса-Моріса, розраховували текстурні коефіцієнти Кернса (f), що характеризують радіальну і тангенціальну складову текстури. По наборам P_i будували зворотні полюсні фігури.

Текстуру в трубах також оцінювали коефіцієнтом відносного стиснення (КВС, CSR). В аерокосмічних стандартах для труб з титанового сплаву Ti-3Al-2,5V , ASM 4945 цей показник введено для труб після холодної прокатки і відпалу для зняття напружень. Коефіцієнт відносного стиснення визначається як відношення істинної осьової деформації E_c до істинної радіальної деформації E_r :

$$\text{CSR} = E_c / E_r. \quad (2)$$

Механічні властивості труб оцінювали випробуваннями: на розтягування з визначенням характеристик межі міцності, межі плинності, відносного видовження та

вимірюванням твердості. Крім цього, виконано дослідження технологічних характеристик труб: роздача, сплющування, загин згідно вимог стандарту ASM 4945.

Залишкові напруження визначали методом Давиденкова розрізанням кілець і замірами величини розходження на великому інструментальному мікроскопі УІМ 23.

У третьому розділі наведені результати дослідження формування структури, властивостей і текстури в трубах із титанових сплавів на перших стадіях виготовлення після кування й гарячого пресування.

Традиційно технологія виготовлення труб передбачає вакуумну виплавку сплаву, кування, пресування і серію холодних прокаток з проміжними вакуумними відпалами або іншими видами термічної обробки. Важливим етапом технологічного процесу виготовлення труб є пресування. Як показали дослідження, які проведені у роботі, текстура, що формується на цій стадії технологічного процесу успадковуються на подальших стадіях деформації.

Різні виробники трубної заготовки використовують різні режими температурно-деформаційної обробки сплаву. Порівняльні дослідження пресованих заготовок від двох виробників показало, що пресування відбувається у β – області або в $\alpha+\beta$ області при температурах 680...980 °С в залежності від планованого ступеню обтиску та потужності пресу. Важливою складовою режиму пресування є швидкість деформації. При низьких швидкостях пресування формується більш рівномірна структура по стінці і довжині пресованої труби.

У роботі досліджували пресовані труби розміром $\text{Ø}85 \times 20$ мм (№1), та 86×27 мм (№2). Встановлено, що труби різних виробників мають різну структуру, текстуру і механічні властивості. На рисунку 2 наведено мікроструктуру труб виробників №1 і №2.

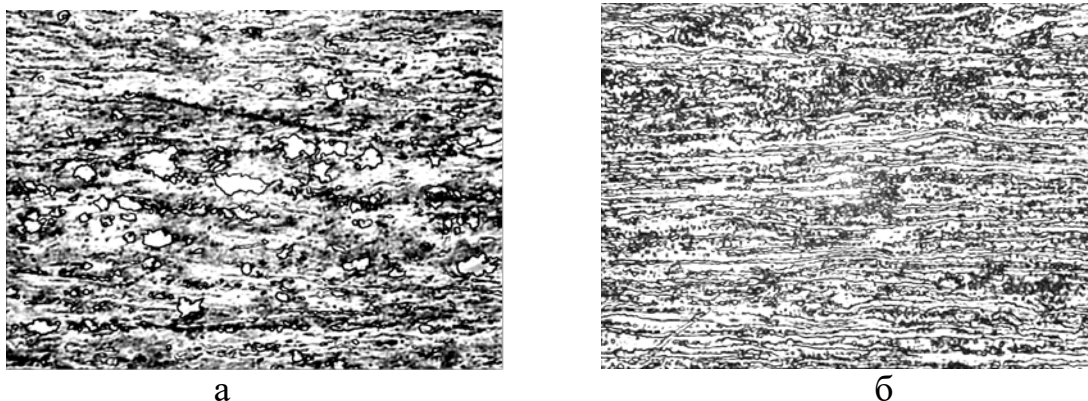


Рисунок 2 – Мікроструктура гарячопресованих труб різних виробників: а – виробник №1, $\times 1000$, б – виробник №2, $\times 1000$

Пресовані труби в основному мають дрібнозернисту деформовану структуру α -фази титану. Дослідження з використанням растрової електронної мікроскопії у контрасті зворотнорозсіяних електронів показало, що мікроструктура центральних ділянок труби має переважно деформовані зерна α -фази. У більшості зерен α -фази проглядаються ділянки з субзеренною структурою з малим субзерном біля 2...5 мкм (рисунок 3). Крім того, в структурі присутні крупні рекристалізовані зерна, розміром до 20 мкм (рисунок 3а). Прошарки β -фази розташовані у вигляді роздроблених смуг вздовж зерен α -фази (рисунок 3б).

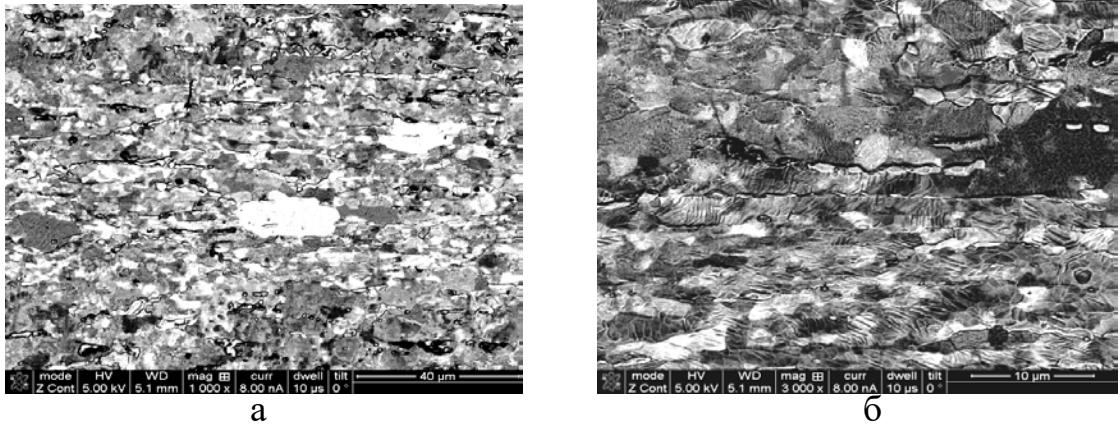


Рисунок 3 – Мікроструктура труби $\text{Ø}80 \times 25$ мм виробника № 1: а – $\times 1000$; б – $\times 3000$

Спостерігається структурна неоднорідність по товщині стінки. Ближче до внутрішніх прошарків труби спостерігається менша кількість ділянок з крупними рекристалізованими α -зернами і більше деформованих β -зерен (рис. 4).

Комплекс механічних та фізичних властивостей титанових псевдо α -сплавів залежить від їх структурно-текстурного стану, який формується, головним чином, при гарячій пластичній деформації. Мікроструктура неоднорідна і складається з фрагментів паралельних грубих пластин α -фази, що розділені прошарками β -фаз, які частково розпалися. Крім того, спостерігається дроблення α -пластин з утворенням нових полідрічних α -зерен. Чим вище температура деформації, тим менше створюється двійників і проходить сфероїдизація пластин α -фази.

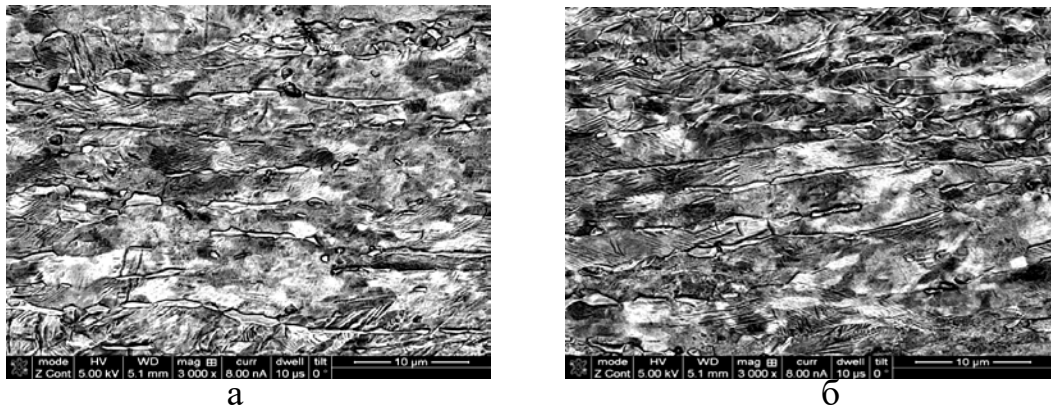


Рисунок 4 – Мікроструктура в периферійних областях зразка труби $\text{Ø}80 \times 25$ мм виробника № 1: а, б – $\times 1000$

Дослідження механічних властивостей гарячопресованих труб обох виробників показало наявність анізотропії властивостей у повздовжньому і поперечному напрямку. У пресованих трубах присутня неоднорідність як у структурі, так і у властивостях по товщині стінки. У внутрішній поверхні твердість вища. У центральній частині труби температура вища, це супроводжується більшим розвитком процесів рекристалізації і твердість нижча. Внутрішня поверхня, має більш низьку температуру, зерна в основному деформовані. Для отримання більш однорідної структури при пресуванні труб треба зниження температури і швидкості деформування. Титан має низьку теплопровідність при нагріванні, тому у заготовці виникає перепад температур, що може бути причиною збільшення нерівномірності текучості металу. Механічні

властивості труб після пресування складають $\sigma_B = 748...751$ МПа, $\sigma_{0,2} = 605...608$ МПа, $\delta = 20...21$ % (для виробника №1) і $\sigma_B = 760...765$ МПа, $\sigma_{0,2} = 654...656$ МПа, $\delta = 17...18$ % (для виробника №2).

Готові труби, згідно з вимогами нормативної документації, повинні мати певну структуру, текстуру, що забезпечують механічні, технологічні властивості, коефіцієнт відносного стиснення, тому важливим є знання про структурно-текстурний стан на стадії пресування та його трансформації на подальших стадіях технологічного процесу.

Важливим завданням у виробництві труб із титану та його сплавів є створення наукових основ для керування текстурою безпосередньо у виробничих умовах на різних стадіях технологічного процесу.

Для дослідження текстури труб виконана рентгенівська зйомка всіх підготовлених зразків у радіальному та тангенціальному напрямках. Зразок рентгенівських діаграм від пресованої заготовки у радіальному та тангенціальному напрямках наведено на рисунку 5.

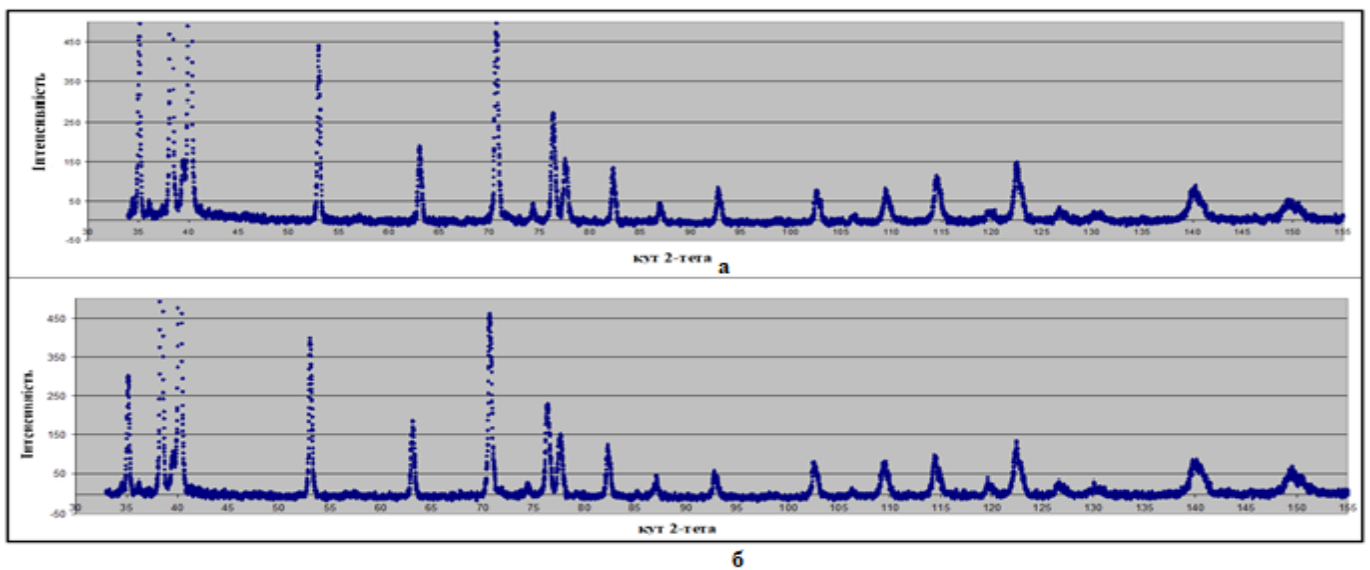


Рисунок 5 – Рентгенівські діаграми зйомки зразка пресованої труби в радіальному напрямку (а) і в тангенціальному напрямку (б)

На рисунку 6 наведені зворотні полюсні фігури та діаграма відповідних значень текстурного параметру f для заготовок титанового сплаву Ti–3Al–2,5V двох виробників (№1 (1-1R, 1-1T) і №2 (2-1R, 2-1T)) після пресування.

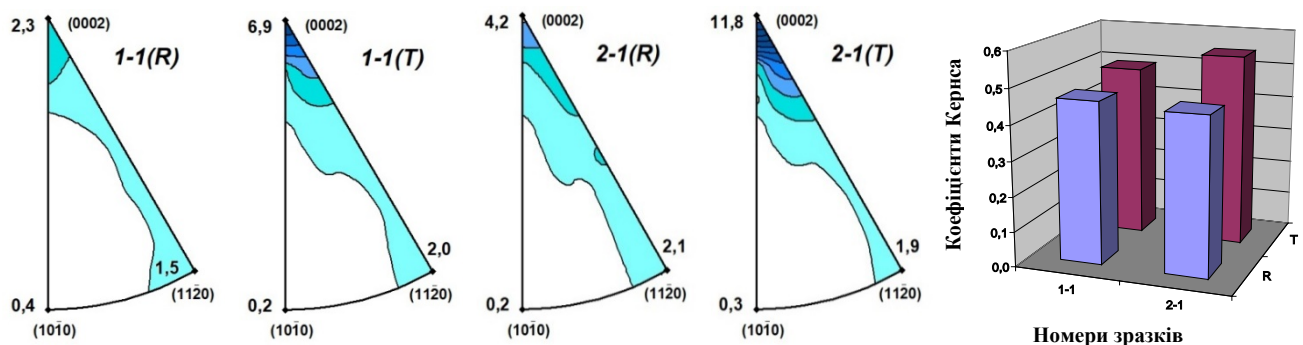


Рисунок 6 – Зворотні полюсні фігури зразків заготовки (а) і діаграма відповідних значень текстурного параметру f (б)

Встановлено, що обидва зразки пресованих труб різних виробників мають радіальну і тангенціальну текстуру. В зразках труб обох виробників тангенціальної складової текстури більше ніж радіальної. Зразок виробника №1 має радіальної складової більше, ніж зразок виробника №2, в якому тангенціальна текстура більш виражена. Коефіцієнти Кернса в трубах виробника №1 складають: у радіальному напрямку $f_r = 0,45$, у тангенціальному напрямку $f_t = 0,48$, а у виробника №2 $f_r = 0,37$, $f_t = 0,52$.

Таким чином, дослідження пресованої трубної заготовки показало, що пресовані труби текстуровані, мають як радіальну, так і тангенціальну складову. Текстура формується на стадії гарячої деформації. На подальші технологічні операції труби подаються вже з сформованою текстурою. Представляє науковий і практичний інтерес наскільки текстура гарячопресованих труб стійка і як успадковується при подальшій холодній прокатці і термічній обробці.

У четвертому розділі розглянуто вплив подальшої холодної пластичної деформації пресованих труб на формування структури, властивостей і текстури у холоднокатаних трубах із сплаву титану Ti-3Al-2,5V.

Розвиток сучасної технології виробництва труб дозволяє отримати бажані фізичні й механічні властивості, які потрібні конструкторам гідравлічних систем. Розвиток авіаційної промисловості змінює вимоги конструкторів до гідравлічних труб. Провідні авіабудівельні фірми розробили свої стандарти, до яких входять нові вимоги до труб. У багатьох нових стандартах вказуються вимоги до коефіцієнта деформації стиснення (CSR), котрий характеризує текстуру труб по аналогії з орієнтацією гідридів у цирконієвих трубах. Текстура в трубах впливає на експлуатаційні характеристики. Так для збільшення втомленого ресурсу труб під дією навантажень на загин і одноразово збереження пластичності та міцності матеріалу труб треба мати в трубах виражену радіальну текстуру. При цьому змінюється ряд властивостей, тому треба знайти їх оптимальне поєднання та забезпечити це при технологічному процесі їх виготовлення.

У залежності від розміру готових труб та розміру заготовки потрібно 4 – 6 проходів деформації та проміжні відпали у вакуумі.

Пресовані труби після одного чи двох проходів холодної деформації на розміри $\text{Ø}50 \times 8$ мм і $\text{Ø}38 \times 5$ мм є заготовкою для виготовлення труб малих розмірів. Ці труби є так звані TREX-труби (TREX – Tube Rolling Extrusion).

Досліджено структуру, властивості та текстуру TREX-труб. У порівнянні з гарячопресованими трубами механічні властивості після прокатки та відпалу знижуються і складають $\sigma_b = 680 \dots 720$ МПа, $\sigma_{0,2} = 535 \dots 563$ МПа, $\delta = 19 \dots 23$ %.

Структура TREX-труб складається із зерен α -титану, які мають полідрічну форму, дрібнодисперсну з зернами номерів 9 – 10, також трапляються зерна 7 – 8 номерів (рис. 7), згідно стандарту ASTM E-112.

Дослідження текстури TREX-труб показало, що текстура, як і пресованих труб, також є радіальною і тангенціальною. Показники радіальної і тангенціальної складової практично однакові з переважанням тангенціальної текстури. Труби з підвищеною пластичністю мають більший відсоток радіальної текстури.

На рисунку 8 наведено зворотні полюсні фігури та діаграма розрахованих коефіцієнтів Кернса, які складають $f_r = 0,38 \dots 0,46$, $f_t = 0,44 \dots 0,52$. Текстура

практично однакова, це свідчить, що проходи холодної прокатки з деформаціями 30...45 % в проході кардинально не змінюють текстури пресованих труб.

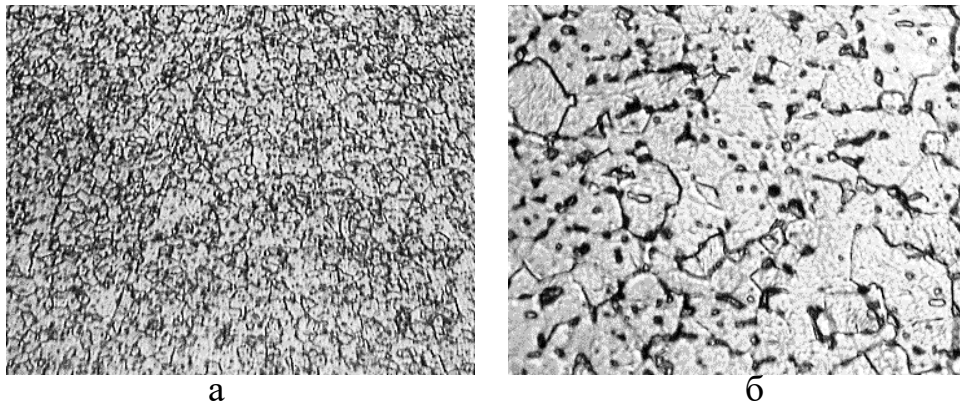


Рисунок 7 – Мікроструктура TREX-труб розміру $\varnothing 38,1 \times 5,36$ мм після відпалу: а – $\times 100$; б – $\times 500$

Подальші холодні прокатки та відпал на проміжних розмірах $\varnothing 25 \times 3,2$ мм, $\varnothing 17,5 \times 1,7$ мм не приводять до збільшення радіальної текстури. Коефіцієнти Кернса труб розміром $\varnothing 17,5 \times 1,7$ мм складають $f_r = 0,43 \dots 0,44$, $f_t = 0,45 \dots 0,51$. У порівнянні з TREX-трубами текстурні параметри змінюються незначно у межах $\pm 0,05$. Це також свідчить о низьких деформаціях у проходах.

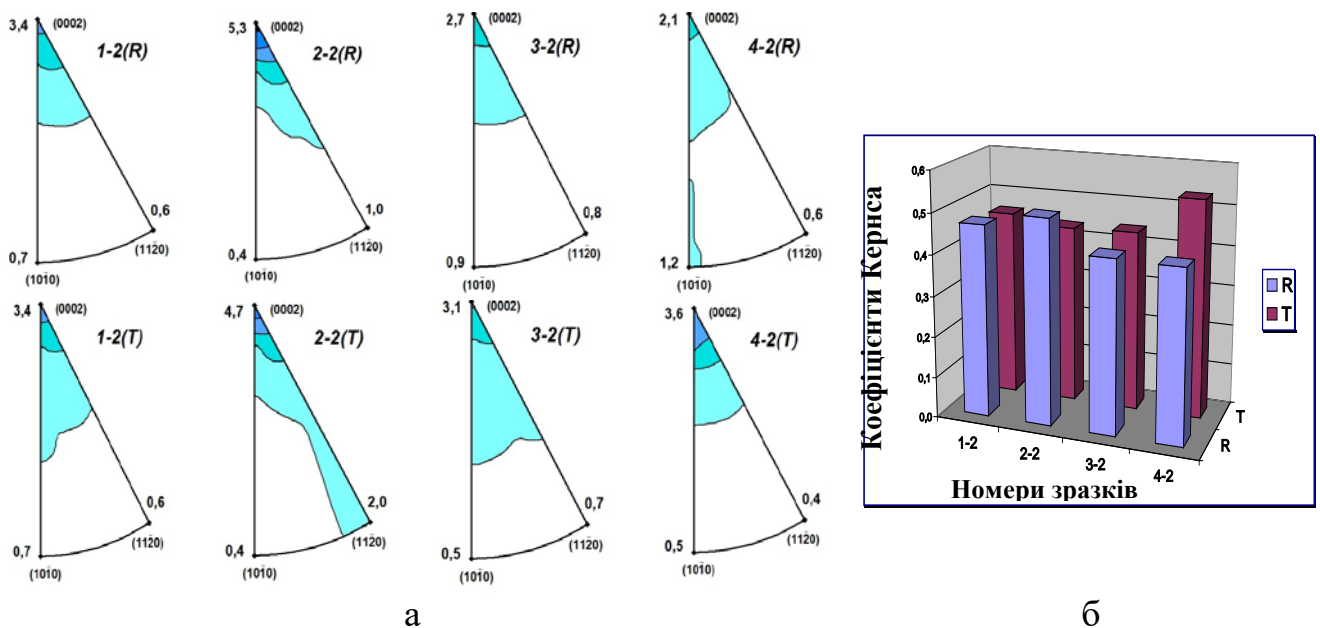
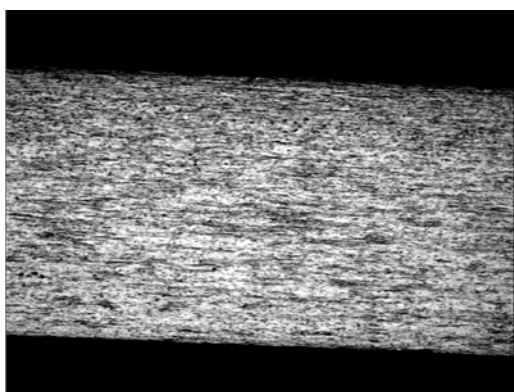


Рисунок 8 – Зворотні полюсні фігури (а) та діаграма розподілу коефіцієнтів Кернса TREX-труб для трьох пакетів у радіальному і тангенціальному напрямках (б)

Дослідження структури готових труб у стані CWSR після деформації і термічної обробки показало, що на останньому проході у готових трубах структура деформованого α -титану. Спостерігається спадкова орієнтація нових зерен у напрямку прокатки (рисунок 9). У роботі досліджена текстура труб готових розмірів: $\varnothing 6 \times 0,5$ мм, $\varnothing 8 \times 1,2$ мм, $\varnothing 9,53 \times 0,483$ мм, $\varnothing 12,7 \times 0,889$ мм. Текстура готових труб розміру $\varnothing 12,7 \times 0,889$ мм наведена на рисунку 10.



а



б



в

Рисунок 9 – Мікроструктура труб готового розміру: а – $\text{Ø}12,7 \times 0,889$ мм ($\times 500$); б – $\text{Ø}6 \times 0,5$ мм ($\times 100$), в – $\text{Ø}6 \times 0,5$ мм ($\times 500$)

Текстурний стан усіх досліджених готових труб характеризується поєднанням текстури (0002) і (10.0) з переважанням текстури (0002). Прокатка труб на готовому розмірі збільшує текстуру, що виражається у підвищеній щільності полюсів (0002). В усіх трубах присутня радіальна та тангенціальна складова текстури. Радіальна складова збільшується від 48 до 57 %, однак не на всіх розмірах, що свідчить про вплив режимів деформування. Для збільшення частки радіальної складової слід включати не тільки механізми пластичної деформації ковзанням, але і двійникуванням, а це потребує більших зусиль, тобто збільшення ступенів деформування. Енергія активації для того, щоб проходило двійникування приблизно вдвічі більша ніж енергія активації ковзанням.

У таблиці 2 наведені механічні властивості та коефіцієнти відносного стиснення труб зі сплаву титану Ti-3Al-2,5V на різних етапах виготовлення.

Механічні властивості готових труб відповідають нормативним вимогам. Оцінка коефіцієнтів відносного стиснення труб після одного холодного переділу показало їх низькі значення 0,9...1,2.

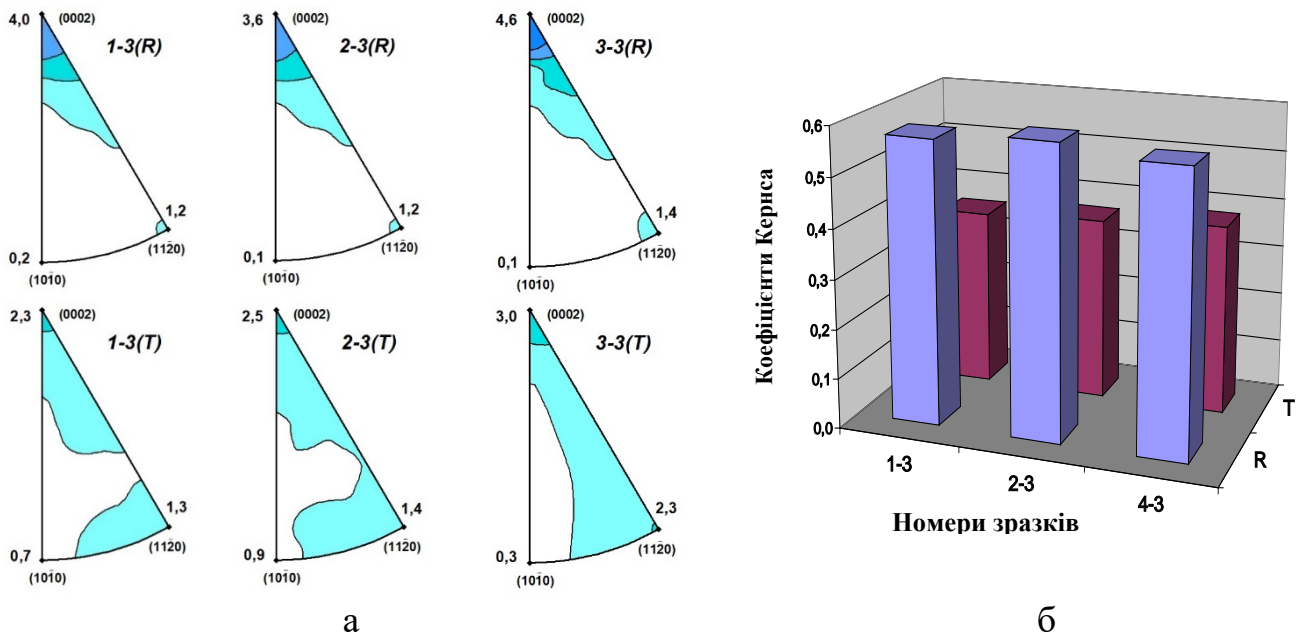


Рисунок 10 – Зворотні полюсні фігури (а) та діаграма розподілу коефіцієнтів Кернса (б) готових труб в радіальному та тангенціальному напрямках

Таблиця 2 – Механічні властивості труб з сплаву Ti-3Al-2,5V

Стан	Механічні властивості			КВС (CSR)
	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	
Заготовка під холодний переділ (трекс-труба)	680...720	535...563	19...23	-
I холодний переділ	907...963	794...856	12...14,4	1,2
Труби готового розміру після деформації	1033...1034	905...912	14,6...15	-
Труби готового розміру після термічної обробки – відпалу для зняття напружень	970...971	830...833	19...21	1,6...2,0
Вимоги нормативної документації	862...979	≥ 724	≥ 14	1,3...3,5

Згідно нормативної документації КВС (CSR) повинен бути в межах 1,3...3,5 в готових трубах. Слід зазначити, що після термічної обробки, яка проходить після кожного проходу пластичної деформації, текстура кардинально не змінюється. Це підтверджено дослідженнями текстури труб після термічної обробки відпалом на різних розмірах труб. Після вакуумної термічної обробки радіальна текстура більш гостра і незначно збільшується. У готових трубах розмірами: $\varnothing 6 \times 0,5$ мм, $\varnothing 8 \times 1,2$ мм коефіцієнти Кернса змінюються у межах $\pm 0,02$. Текстура залишається майже не змінною. Це підтверджується наведеними на рисунку 11 зворотними полюсними фігурами до і після термічної обробки.

У промислових умовах виробники часто не можуть отримати комплекс властивостей, які потребують технічні вимоги, особливо КВС (CSR). У роботі проведено аналіз маршрутів деформації і співвідношення деформації по стінці і діаметру.

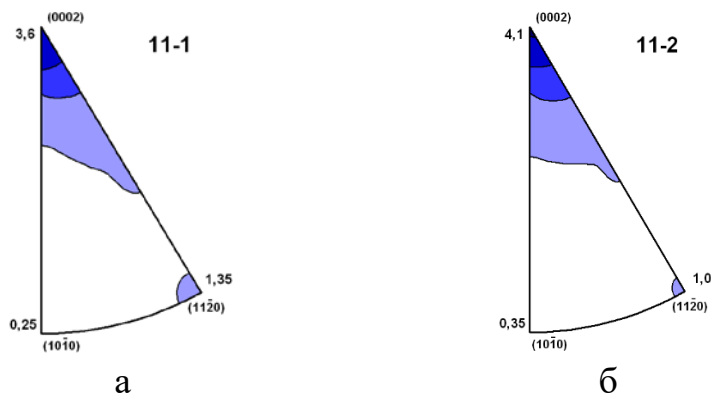


Рисунок 11 – Зворотні полюсні фігури зразків труб до термічної обробки (а) та після термічної обробки труб (б)

Низькі ступені деформації у проходах 40...50 % не завжди забезпечують вимоги нормативної документації по механічним властивостям, особливо по показниках межі плинності і відносного видовження. При цьому труби мають низькі показники КВС (CSR).

У роботі у промислових умовах проведено експеримент по прокатці труб зі збільшеними ступенями деформації за прохід. Експерименти довели, що збільшення ступеню деформації до 75...85% збільшує як рівень механічних властивостей, так і показники коефіцієнту відносного стиснення до рівня 1,6...3,0. На рисунку 12 наведені ЗПФ труб, які прокатані з високими ступенями деформації. Характеристики інтенсивності рентгенівських ліній значно відрізняються від раніше досліджених зразків. Вони значно вище. Розрахунок параметрів Кернса показав, що у цих зразках значно більший відсоток радіальної складової текстури до 65...70 %. Згідно теоретичним уявленням максимальне значення параметрів Кернса у радіальному напрямку не може перевищувати 75 % для металів з ГЦУ решіткою.

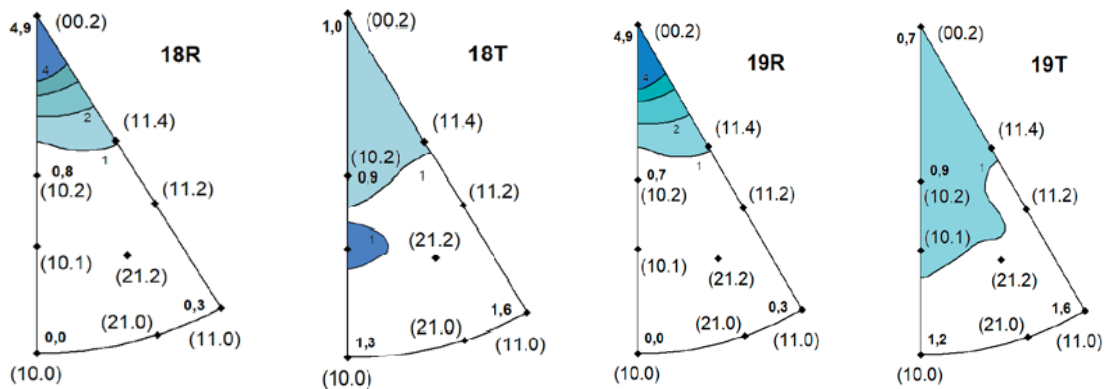


Рисунок 12 – Зворотні полюсні фігури зразків готових трубах після прокатки з високими ступенями деформації

Важливим показником у цьому експерименті є дотримання високих показників коефіцієнта Q на рівні $Q = 3,75...5$. Доведено, що коефіцієнт Q не повинен бути менше 3.

Розмір труб впливає на їх механічні властивості, особливо на відносне видовження, яке зменшується зі зменшенням розміру труб.

Вірогідно, зі збільшенням кількості проходів деформації і ступеню деформації формується більш гостра текстура, причому, в основному радіальна і текстурне зміцнення впливає на відносне видовження. Чим менше відносне видовження, тим

нижче коефіцієнт відносного стиснення. На рисунку 13 наведено вплив відносного видовження на коефіцієнт відносного стиснення (CSR).

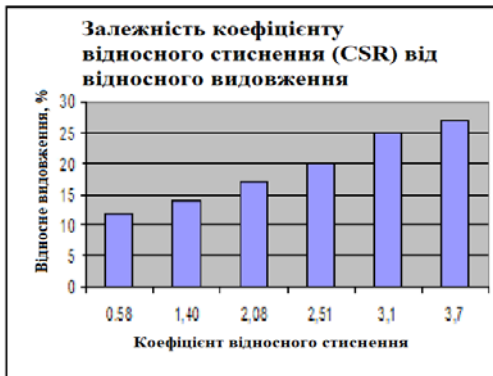


Рисунок 13 – Залежність коефіцієнта відносного стиснення (CSR) від відносного видовження

Кристалографічна текстура у металах з ГЦУ решіткою є важливою характеристикою, яка впливає на зміцнення металу, на анізотропію ряду його властивостей. При виготовленні труб з титану можливе отримання різних текстур за рахунок варіювання пропорцій деформацій по стінці та діаметру. Крім того, значну роль відіграє загальний ступінь деформації, особливо на останніх проходах при виготовленні труб. У роботі доведено, що зі збільшенням кількості проходів і ступеню деформації формується більш гостра текстура в основному радіальна. Текстульне зміцнення впливає на відносне видовження.

Аналіз результатів досить великого статистичного набору досліджень, виконаних у роботі, по оцінці механічних властивостей і коефіцієнта відносного стиснення, дозволив оцінити вплив текстури на механічні властивості і визначити наявні значення поєднання CSR і механічних властивостей. Стандарти ASM, які розроблені для трубної продукції, зокрема для труб у стані CWSR, встановлюють допустимі межі механічних властивостей: σ_b min 621...862 МПа, max 828...980 МПа; $\sigma_{0,2}$ min 517 МПа, max 730 МПа, δ для стінок $\leq 0,41$ мм – 8 %, а для стінок $\geq 0,41$ – 10 %. Дослідження залежності зміни коефіцієнта CSR від показників межі міцності труб із сплаву Ti-3Al-2,5V наведено на рисунку 14. Область оптимальних показників коефіцієнта CSR відповідає показникам межі міцності 875...925 МПа; для межі плинності це показники 750...780 МПа (рис. 14), а для відносного видовження 17,5...27,5 % (рис. 16). При низьких показниках межі плинності і відносного видовження коефіцієнти CSR низькі і не вкладаються у вимоги стандарту 1,3...3,5.

Встановлено, що при високих значеннях коефіцієнтів CSR (3,0...3,5) найчастіше труби не витримують технологічні випробування. Це, ймовірно, пов'язано з формуванням такої текстури деформації, яка веде до більшого зміцнення, як наслідок розтріскування та руйнування металу, зумовленого поворотом зерен у положення, яке ускладнює подальшу деформацію у тому ж напрямку. У зв'язку з цим, потрібна оптимізація текстури гідравлічних труб з метою забезпечення найкращого поєднання властивостей. Як показали дослідження коефіцієнт CSR слід зменшити і замість 3,5 слід вказати значення 2...2,5. Встановлено, що чим менше відносне видовження, тим нижче коефіцієнт відносного стиснення (рис. 15).

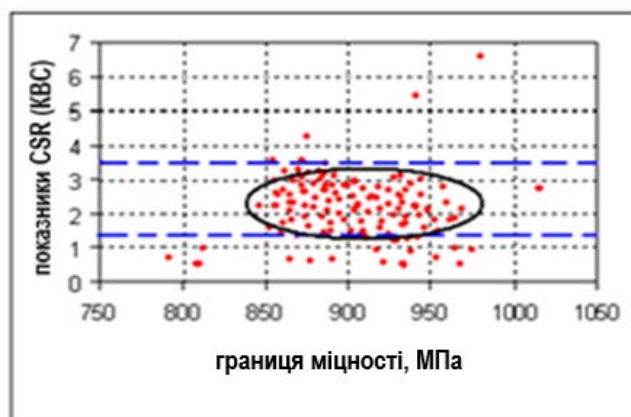


Рисунок 14 – Вплив границі міцності на показники CSR



Рисунок 15 – Вплив границі плинності на показники CSR

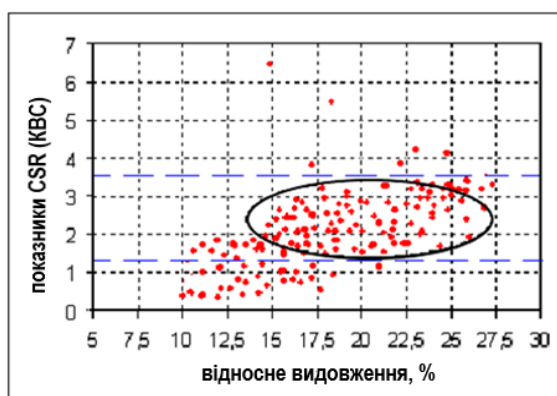


Рисунок 16 – Вплив відносного видовження на показники CSR

Механічні властивості готових труб знаходяться на верхній межі вимог нормативної документації, мають низький CSR і низький відсоток радіальної текстури. Виконаний експеримент щодо збільшення ступеню деформації на останніх проходах до 80...85 % та збільшення коефіцієнта Q не нижче 3 показав позитивну тенденцію до збільшення CSR, а також збільшення кількості радіальної текстури до 65...70 %.

У п'ятому розділі розглянуті питання термічної обробки при виготовленні труб. У першу чергу це можливість охолодження пресованих труб безпосередньо з пресу у воду – гартування. Охолодження у воді дозволяє отримати більш якісну поверхню, що веде до меншого зняття поверхневого шару, і як наслідок, зменшення витратного коефіцієнту дорогого металу.

Проведено порівняльні дослідження пресованих труб із сплавів Grade 9 і ПТ-1М після охолодження на повітрі і гартуванні у воді.

Після охолодження на повітрі структура труб із сплаву Grade 9 складається з α -пластин і β -фази (рис. 17). Вздовж напрямку деформації знаходяться крупні ділянки β -фази.

Після гартування в структурі присутні мартенситні фази α' , α'' і ω , що представляють собою пересичений твердий розчин легуючих елементів в α -титані з гексагональною α' чи ромбічною α'' решіткою. Поряд з утвореними фазами, що мають голчасту структуру зберігається β -фаза, що залишається. В середині якої формується ω -фаза мартенситного типу, яка когерентна зв'язана з матричною β -фазою і має гексагональну спотворену решітку. Присутність ω -фази збільшує

твердість і різко знижує пластичність. Її кількість незначна, тому не виявляється різке зниження пластичності. ω -фаза дуже дисперсна і не спостерігається у світловому мікроскопі. Гартування веде до формування більш тонкодисперсної полосчатої структури.

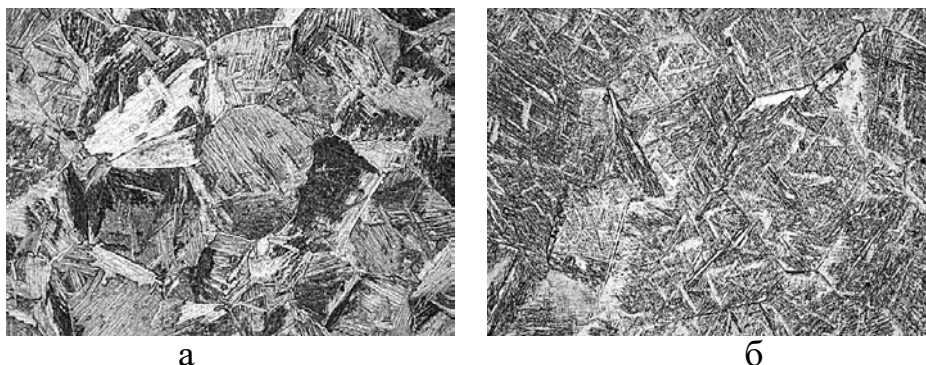


Рисунок 17 – Мікроструктура сплаву Grade 9 після пресування і охолодження: а – на повітрі, $\times 200$, б – у воді, $\times 200$

Твердість збільшується з 212 НВ при охолодженні на повітрі до 223...230 НВ після гартування у воді. Після гартування проведена термічна обробка у вигляді рекристалізаційного відпалу у вакуумі при температурі 650 °С 1 година.

Рівень властивостей і структура труб після гартування і рекристалізаційного відпалу дозволяє проводити подальшу деформацію.

Аналогічні дослідження виконано на сплаві ПТ-1М. Оскільки цей сплав титану менше легований, тому структура, яка формується, складає α -фазу: мартенситну α' -фазу з залишками β -фази (рис. 18).

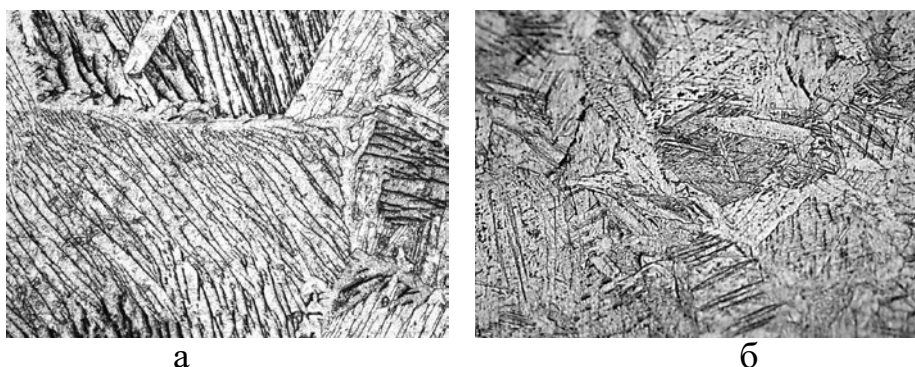


Рисунок 18 – Мікроструктура труби із сплаву ПТ-1М після пресування і охолодження: а – на повітрі, $\times 200$, б – у воді, $\times 200$

Дослідження рівня зміцнення показало, що після гартування метал зміцнився незначно, що характерно для низьколегованих сплавів титану, які практично не зміцнюються термічною обробкою. Твердість HRB у зразку охолодженому на повітрі складає 67...68 HRB (114...115 НВ). При охолодженні у воді 71...72 HRB (120...121 НВ). Механічні властивості після гартування та термічної обробки складають $\sigma_b = 480...500$ МПа; $\sigma_{02} = 420...460$ МПа; $\delta = 22...28$ %.

Труби після гартування і рекристалізаційного відпалу можуть бути деформовані відповідно до існуючої технологічної схеми прокатки труб. У промислових умовах труби зі сплавів титану після гартування прокатані до готових

розмірів. Рівень властивостей готових труб відповідає вимогам технічної документації. Всі труби пройшли здавальний контроль.

Таким чином, встановлена можливість гартування у воді труб із сплавів титану після пресування. Перед холодною прокаткою при подальшому виготовленні труб обов'язково треба проводити термічну обробку у вигляді рекристалізаційного відпалу.

У процесі виготовлення труб після холодної деформації на проміжних розмірах використовують термічну обробку у вигляді рекристалізаційного відпалу, а на трубах готового розміру – термічну обробку для зняття напружень (стан CWSR). Дослідження механічних властивостей зразків при нагріві підтвердило, що інтервал температур рекристалізації сплаву Ti-3Al-2,5V знаходиться у межах 650...800 °C.

Одним з видів термічної обробки готових труб із сплаву титану Ti-3Al-2,5V є обробка для зняття залишкових напружень. Це є вимогою стандарту ASM 4945, по якому виготовляються труби. Для уточнення температури зняття залишкових напружень на трубах розміром $\varnothing 15 \times 0,8$ мм проведені випробування і побудована залежність залишкових напружень від температури відпалу (рис.19).

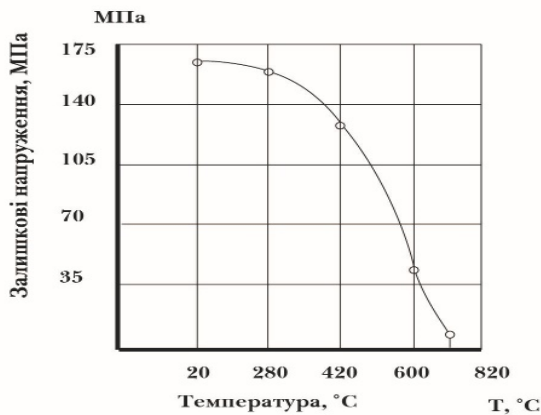


Рисунок 19 – Залежність залишкових напружень від температури відпалу

Встановлено, що оптимальною є температура 430...580 °C. Термічна обробка готових труб впливає на показники механічних властивостей і коефіцієнта відносного стиснення.

Параметр Кернса в готових трубах після термічної обробки для зняття залишкових напружень змінюється в межах не більше $\pm 0,02$.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі зроблено теоретичне узагальнення та запропоновано нове вирішення науково-практичної задачі, яка полягає у вдосконаленні технологічного процесу виготовлення труб зі сплаву титану Ti-3Al-2,5V для гідросистем літаків, що дозволяє сформувати належні структурні, механічні, технологічні та текстурні властивості, які забезпечують експлуатаційні характеристики труб. На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень зроблено наукові та практичні висновки:

1. На основі вітчизняних та закордонних літературних даних проаналізовано умови експлуатації труб з титану для гідравлічних систем літаків та узагальненні основні вимоги до труб, що пов'язані зі створенням поєднання механічних, технологічних, структурних та текстурних властивостей, які забезпечуються технологією виготовлення труб. Узагальненні матеріали провідних фірм виробників труб з титану для авіації.

2. Комплексно оцінено формування мікроструктури, механічних та технологічних властивостей, текстури та коефіцієнту відносного стиснення на всіх технологічних етапах при виробництві труб зі сплаву Ti-3Al-2,5V: гарячого пресування; виготовлення ТРЕХ-труб; холодних прокаток; термічної обробки різних видів (рекристалізаційний відпал, відпал для зняття напружень, гартування).

3. Вперше з використанням рентгеноструктурного аналізу, шляхом побудови зворотних полюсних фігур та розрахунку коефіцієнтів Кернса простежено формування і спадковість текстури труб на всіх технологічних етапах виготовлення труб. Встановлено, що при прокатці труб формується двохкомпонентна текстура – радіальна та тангенціальна. Основні текстурні складові, як радіальна, так і тангенціальна формуються на стадії гарячої деформації пресуванням. У подальшому текстура труб змінюється незначно, крім труб спеціально прокатаних з високими ступенями деформації. Тектурний стан усіх досліджених готових труб характеризується поєднанням текстури (0002) і (10.0) з переважанням текстури (0002). Прокатка труб на готовому розмірі збільшує текстуру, що виражається у підвищенні щільності полюсів (0002).

4. Досліджено комплекс властивостей гарячопресованих труб зі сплаву Ti-3Al-2,5V двох виробників (№1 і №2). Встановлено, що у виробника №1 пресовані труби мають більшу кількість радіальної складової (до $f_r = 0,43$) при цьому трапляється неоднорідність по товщині стінки та різнозернистість. У виробника №2 структура дрібнозерниста, більш однорідна, хоча має меншу радіальну складову ($f_r = 0,39$), що пов'язано з різними режимами пресування. Для забезпечення формування більш однорідної структури труб першому виробнику рекомендовано знизити температуру та швидкість пресування і використовувати більш потужні преси.

5. Виготовлення ТРЕХ – труб, практично не змінює текстуру труб. Розроблено та випробувано нові режими деформаційно-термічної обробки на стадії холодної деформації готових труб. Збільшено: ступінь деформації на останніх проходах до 80...85 %; коефіцієнт обтиснення по стінці і діаметру до $Q = 3,5...5$, що дозволило підвищити відсоток радіальної текстури в трубах (до 65 %) та забезпечити поєднання високих вимог механічних і технологічних властивостей, а також коефіцієнту відносного стиснення. Всі ці заходи сприяють підвищенню експлуатаційних властивостей труб з титанових сплавів відповідального призначення.

6. Показано, що чим менший розмір готових труб, тим нижче відносне видовження, це пов'язано зі збільшенням текстурного зміцнення при збільшенні кількості проходів.

7. Встановлено взаємозв'язок між рівнем механічних властивостей труб і коефіцієнтом відносного стиснення. Дослідження показали, що оптимальними коефіцієнтами, які забезпечують вимоги стандартів на труби, є коефіцієнти 1,3...2,5 (у технічних вимогах 1,3...3,5). При високих показниках коефіцієнту відносного стиснення труби не витримують технологічних випробувань на роздачу, сплющування та загин.

8. Встановлено, що термічні обробки такі, як рекристалізаційний відпал, відпал для зняття напружень (CWSR) кардинально не змінюють текстури труб. Параметр Кернса в готових трубах після термічної обробки для зняття залишкових напружень змінюється в межах не більше $\pm 0,02$.

9. На основі результатів, отриманих у дисертаційній роботі, розроблено рекомендації щодо удосконалення технологічного процесу виготовлення труб зі сплавів титану. Проведено промислове виготовлення труб за розробленими режимами. Отримані труби відповідають вимогам нормативної документації. У роботі є акт впровадження результатів роботи у технологічний процес на ТОВ «ВО Оскар». Теоретичні і технологічні розробки дисертаційної роботи мають універсальні значення, можуть бути використані при виготовленні труб з титану і його сплавів.

10. Результати досліджень дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковані основні результати дисертації

1. Грузин Н. В., Вахрушева В. С. Дослідження впливу початкової текстури заготовки на текстуру готових труб зі сплаву титану Ti-3Al-2,5V. *Матеріалознавство та термічна обробка металів* : Наук. та інформ. журн. Дніпропетровськ, 2015. Вип. №3 (70). С. 16–20.

2. Грузин Н. В., Джуган А. А. Формирование структуры и свойств титановой проволоки из сплава ВТ1-0 для медицины при термической обработке. *Інформаційні системи, механіка та керування*. Київ, 2016. №14. С. 82–87.

3. Грузин Н. В., Вахрушева В. С., Лихопек П. А. Формирование структуры и свойств при прессовании труб из сплава титана Ti-3Al-2,5V. *Будівництво, матеріалознавство, Машинобудування. Серія «Стародубовські читання»*. Зб. наук. праць. Дніпро, 2017. Вип. 95. С. 45–50.

4. Грузин Н. В., Вахрушева В. С. Оценка текстуры и свойств труб из сплава Ti-3Al-2,5V после горячей деформации прессованием. *Інформаційні системи, механіка та керування*. Наук.-техн. збірник. 2017. Вип. №17. С. 67–75.

5. Hruzin N. V., Vakhrusheva V. S., Malykhin D. G. Features of formation of crystallographic texture and properties in Ti-3Al-2,5V titanium alloy during tubes manufacture. *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. Харьков, 2019. Вып. 115, № 5 (123). С. 105 – 112.

6. Грузин Н. В., Вахрушева В. С. Влияние степени деформации при холодной прокатке труб из сплава титана на формирование текстуры и свойств. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2019. Vol. 41, No. 10 (2019). Pp. 1303–1314.

7. Грузин Н. В., Вахрушева В. С., Тютюрев І. А., Малиш О. Д. Вплив текстури на механічні властивості труб із сплаву титану. *Металознавство та термічна обробка металів*. Наук. та інформ. журнал. Дніпро, 2019. Вип. №4 (87). С. 16 – 21.

8. Hruzin N.V., Vakhrusheva V. S., Tiutieriev I.A., Malysh O.D. Influence of texture on mechanical properties of titanium alloy tubes. *Key Engineering Materials*. Switzerland, 2020. Vol. 844. Pp. 182 – 187.

9. Грузин Н.В. Оцінка можливості гартування труб із сплаву титана після пресування. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. Збірник наук. праць. 2020, Вип. 91. С. 160 – 164.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

10. Грузин Н. В., Коленкова О. А. Особенности структуры слитков и сплава циркония Zr1Nb полученных различными способами выплавками. *Людина і космос. Випереджаючи час* : тези доп. 12 міжн. молод. наук.-практ. конф., м. Дніпропетровськ, 2010 р. С. 429.

11. Грузин Н. В., Вахрушева В. С., Лопушина К. Ю., Белявцева А. В., Малыхин Д. Г. Формирование текстуры при производстве труб из сплавов титана. *Стратегия качества в промышленности и образовании Том 1* : тези доп. 11 межд. конф. Варна, Болгария, 1-5 июн. 2015. С. 40 – 44.

12. Грузин Н. В., Джуган О. О. Формирование структуры и свойств титановой проволоки из сплава VT1-0 для медицины при термической обработке. *Людина і космос* : тези доп. 18 міжн. молод. наук.-практ. конф., м. Дніпропетровськ, 2016. С. 285.

13. Грузин Н. В., Вахрушева В. С. Текстура в трубах из сплава Ti–3Al–2,5V и ее влияние на свойства. *ТИТАН 2016: виробництво та використання в авіабудуванні* : доклад на IV міжн. наук.-практ. конф. м. Запоріжжя, 3-4 лист. 2016 р.

14. Грузин Н. В., Вахрушева В. С. Влияние термической обработки на изменение текстуры холоднокатанных труб из сплава титана. *Стратегия качества в промышленности и образовании. Том 2* : тези доп. XIII межд. конф., г. 5-8 июня 2017 г. Варна, Болгария : Технический университет. С. 53 – 57.

15. Грузин Н. В., Вахрушева В. С. Оценка текстуры и свойств труб из сплава Ti–3Al–2,5V после горячей деформации прессованием. *Людина і космос. Випереджаючи час* : тези доп. 19 міжн. молод. наук.-практ. конф. м. Дніпро, 2017. С. 260.

АНОТАЦІЯ

Грузин Н.В. Формування структури, текстури та властивостей труб у сплавах титана на різних стадіях виробництва. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 «Матеріалознавство» (13 – Механічна інженерія). – Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2020.

Дисертація спрямована на вирішення науково-практичної задачі, що полягає в отриманні у процесі виготовлення комплексу властивостей у трубах із сплаву титану Ti–3Al–2,5V, особливо певної текстури.

Досліджені особливості формування структури, механічних і технологічних властивостей, а також текстури у трубах на стадіях пресування, холодної деформації, а також різних видів термічної обробки: рекристалізаційного відпалу, відпалу для зняття залишкових напружень, гартування.

Встановлені параметри технологічного процесу виробництва труб: ступінь деформування, коефіцієнти обтиснення по стінці та діаметру, температура і режими термічної обробки. Виявлена залежність цих параметрів для отримання радіальної текстури та взаємозв'язок з коефіцієнтом відносного стиснення.

Сформовані в роботі рекомендації впроваджені у виробництво на ТОВ «ВО ОСКАР», а також отримані результати використані у навчальному процесі кафедри матеріалознавства і обробки матеріалів ДВНЗ ПДАБА.

Ключові слова: сплави титану, деформація, механічні і технологічні властивості, текстура, структура, коефіцієнт відносного стиснення.

SUMMARY

Hruzin N.V. Formation of structure, texture and properties of pipes in titanium alloys at different stages of production. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertations for the scientific stage of the candidate of technical sciences for specialty 05.02.01 «Materials science» (13 – Mechanical engineering). – State Higher Educational Establishment "Pridniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture", Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2020.

The dissertation is based on the development of a scientifically-practical design, which has been rejected in the process of preparing a complex of powers in pipes from the titanium alloy Ti–3Al–2,5V, especially singing texture.

Essence of the scientific and applied problem, which is considered in the research paper consists in creating and implementing in practice theoretical and technological foundations of elaborating a process of production of titanium alloy tubes for responsible purposes, namely, aircraft building. In order to ensure high operational reliability, the tubes manufactured in Ukraine according to foreign standards ASM and ASTM are subject to requirements to their properties and texture. To ensure satisfaction of standard requirements, it is necessary to elaborate the manufacturing processes based on creation of certain types of crystallographic texture which affects mechanical and processing characteristics and provides specific strength in the process of working.

Practical significance of theoretical and technological developments consists in improvement of the process of production of titanium alloy tubes and bettering quality indicators of their operation.

The technology of making seamless tubes of titanium alloy of Ti–3Al–2,5V type continues to develop because this alloy is used in ever increasing number of production programs. Such progress dictates the need to expand studies aimed at improvement of manufacturing processes to achieve desired mechanical properties, structure and certain types of texture in the finished tube material determining its properties, fatigue resistance and deformability.

Creating a certain type of texture in the manufacture of titanium alloy tubes is a new challenge for the pipe and tube industry. It requires serious research efforts. This is also a very important problem for Ukrainian manufacturers of titanium alloy tubes. Moreover, it is necessary to combine creation of certain structure types, properties and textures as well as processing characteristics of titanium tubes.

Change and heredity of tube texture after pressing, cold working and heat treatment were traced. Texture in hot-extruded tubes was stable and changed slightly with subsequent cold working. To change the texture, it is necessary to change the cold rolling schedules.

The study of influence of large strain ratios and the factor Q (the wall to diameter strain ratio) showed the possibility of influencing the properties and texture of cold-worked tubes.

The contractive strain ratio (CSR) is an important indicator in the production of Ti-3Al-2,5V alloy tubes. In accordance with foreign standards, it characterizes the tube texture. Achieving it in the tube making process is a hard task.

The contractive strain ratio which is set at 1,3...3,5 in regulatory documents, does not always provide a necessary set of mechanical and especially processing properties. The optimal contractive strain ratio which characterizes texture in the manufacture of tubes is 1,5...2,5. At its higher values, a number of tubes do not withstand processing tests and also have a higher level of mechanical properties compared to the required ones.

Additional special features of the formation of structure, mechanical and technological powers, as well as the texture of pipes at the stages of pressure, cold deformation, as well as different types of thermal treatment: recrystallization, overwhelming fires.

Texture characteristics, namely, quantity of components of radial and tangential textures determined by Cairns parameters at all stages of tube production: in a billet, after hot working and subsequent cold working at various stages depending on tube size and also after heat treatment were experimentally established and quantified for the first time.

It was found that the billet was textured and had both radial and tangential components (30...40 % and 45...65 %, respectively) after forging and pressing. Heredity of the original texture was traced. Subsequent cold working slightly increases the radial texture content by 11...15 %. The overall deformation ratio and distribution of wall and diameter deformation are important factors. Heat treatment does not change essentially the tube texture.

It has been shown for the first time that heat treatment, namely, stress relief annealing (CWSR) does not change texture of Ti-3Al-2,5V alloy tubes.

Practical value of the results obtained in the performed studies consists in that proposals for real industrial production of tubes of Ti-3Al-2,5V alloy (Grade 9) were elaborated and proposed based on them and their theoretical substantiation:

- parameters of hot deformation with high values of anisotropy properties in wall thickness of hot-worked tubes, namely, decrease in temperature and speed of the pressing process;
- achievement of high relative contractive strain ratio (1,3...2,5) which is ensured by creation of the radial texture component in tubes at a level of 60...70 %;
- optimal contractive strain ratio should be at a level of 1,3...2,5 to achieve the tube quality specified in standards;
- to create a predominantly radial texture, the ratio of wall thickness to diameter strain (coefficient Q) must be not less than 2,5...3;
- a technology was elaborated and tubes that meet requirements of standards were rolled with adoption of the proposed recommendations: the act of implementation of the results of the dissertation work on LLC "VO OSCAR" from 11. 11. 2019.

Key words: titanium alloys, deformation, mechanical and processing characteristics, texture, structure, contractive strain ratio.