

СПЕЧЕНІ ТИТАНОВІ СПЛАВИ ДЛЯ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

*О.Є. Капустян, О.В. Овчинников, Т.Б. Янко**

Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

E-mail: aek@zntu.edu.ua;

**ПАТ «Інститут титану», Запоріжжя, Україна*

Розглянуто можливості використання спечених титанових сплавів як конструкційних матеріалів в атомній енергетиці; марки порошків титану, що промислово випускаються в Україні і придатні для отримання виробів для атомної енергетики. Показано принципова можливість отримання напівфабрикатів титанових сплавів методом порошкової металургії із забезпеченням необхідної концентрації елементів і технологія виготовлення напівфабрикатів і готових виробів із спечених титанових сплавів. Підтверджено високу якість напівфабрикатів титанових сплавів, отриманих з використанням технологій порошкової металургії і зварювання. Показано, що застосування розробленої ресурсозберігаючої інтегрованої технології дозволить знизити вартість кінцевих виробів без зниження механічних характеристик, а також залежність України від зовнішніх постачальників напівфабрикатів і готової продукції з титану і його сплавів.

ВСТУП

На сьогоднішній день 55% електричної енергії в Україні виробляють 4 атомні електростанції [1] з 15 водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР). Стратегія ядерної енергетики України включає в себе будівництво і введення в експлуатацію 11 нових реакторів до 2030 року [2]. Титан і його сплави широко використовують в якості конструкційного матеріалу в атомній енергетиці для виготовлення конденсаторів, робочих лопаток парових турбін [3, 4], теплообмінного обладнання [5–8], при виробництві силових кріпильних елементів фланцевих з'єднань і роз'ємів різних технологічних систем реакторного обладнання атомних і термоядерних установок [9]. Перевагами титанового обладнання є висока питома міцність, корозійна стійкість в різних середовищах, стабільність механічних властивостей, технологічність, ядерні властивості та здатність до зварювання різними типами зварювання, гарантований ресурс роботи на період до 60 років [10, 11]. Загальне споживання титану на один енергоблок ВВЕР становить не менше 1350 т титанових напівфабрикатів і зварювальних матеріалів [12].

До цього часу основна частина потреб титану забезпечувалась прокатом виробництва ВАТ «Корпорація ВСМПО-АВІСМА», Російська Федерація, що ставить Україну в залежність від зовнішніх постачальників напівфабрикатів і готової продукції з титану і його сплавів, тим самим знижує фінансову стійкість і конкурентоспроможність вітчизняних виробників. При цьому Україна має найбільші в Європі ресурси і рудні запаси титану та є єдиним в Європі виробником основної сировини титану губчастого (до 20000 т/рік), що в повному обсязі може забезпечити власні потреби.

Для подальшого успішного застосування титану в атомному машинобудуванні визначальним є підвищення якості титанових злитків, одночасно зі зниженням їх вартості [13]. Ресурсозбереження, насамперед у високотехнологічних галузях промисловості, є сучасною основною світовою

тенденцією розвитку економіки. Тому одним з головних завдань при розробці нових технологій і розвитку сучасного атомного машинобудування є ресурсозбереження. У зв'язку з цим розробка і впровадження ефективних технологічних рішень у серійне виробництво є найважливішим напрямком, що забезпечує економію металу і енергії на всіх етапах виробництва. Таким чином, є актуальним проведення теоретичних і експериментальних досліджень і формування на їх базі науково-технологічних основ розробки високоефективних технологічних процесів і створення устаткування, що дозволить розв'язати важливу науково-прикладну проблему забезпечення та прогнозування високої якості деталей атомної енергетики в процесі їх виробництва.

Суттєве зниження собівартості виробів атомної енергетики можливе шляхом застосування заготовок деталей, які отримані методами порошкової металургії (ПМ).

Можливість застосування даних методів доведена при виробництві феритних і феритно-мартенситних радіаційно стійких сталей, що включає компактування швидкозагартованих порошків зі сферичною або лускатою формою [14, 15]. Також відомо про дослідження можливості застосування компактного гідриду титану та матеріалів на основі дробу гідриду титану в біологічному захисті транспортних ядерних енергетичних установок [16].

Основними недоліками технології прямого ущільнення порошків, що перешкоджають її широкому застосуванню, є:

- висока залишкова пористість і, як наслідок, більш низький в порівнянні з деформованими заготовками рівень комплексу фізичних, механічних і спеціальних властивостей;

- стан поверхневого шару титану, який сильно впливає на механізми втомного руйнування і циклічну довговічність [17];

- проблематичність виготовлення виробів складної геометричної форми, а також довгомірних напівфабрикатів.

Поліпшити стан і властивості поверхневого шару титану та сплавів на його основі можливо з використанням різноманітних видів концентрованих потоків енергії [18, 19], термодифузійної обробки.

Пористість є невід'ємною частиною сплавів, які виготовлені з порошків, і має суттєвий вплив на механічні та службові властивості деталей з таких сплавів. Найпоширенішим методом мінімізації розмірів і кількості пор в металі і, по можливості, повне їх усунення є ущільнення порошкових заготовок під високим тиском. Для усунення пор використовуються гаряче штампування в закритих і відкритих штампах [20], гаряче ізостатичне пресування (ГП), методи інтенсивної пластичної деформації (ІПД). ГП підходить для ущільнення титанового сплаву, компактованого з порошків тільки сферичної форми. Методи ІПД потребують складного обладнання та підходять для формовок незначних розмірів.

Залишається дискусійним питання про ефективність застосування кування залежно від використовуваних порошків титану, зокрема для найбільш перспективних, з погляду зниження вартості одержання, деформованих напівфабрикатів порошків, одержуваних з титанової губки.

Застосування прогресивних технологій зварювального виробництва дозволяє вирішити проблеми виготовлення виробів складної геометричної форми, а також довгомірних напівфабрикатів та сприятиме зменшенню кількості різбових та паяних сполучень.

Мета роботи – розробка та відпрацювання ресурсозберігаючої технології виготовлення напівфабрикатів і деталей для атомної енергетики з титанових сплавів із заданим хімічним складом шляхом застосування методів ПМ і зварювання із сировини вітчизняного виробництва; оцінка ефективності застосування методу ущільнення куванням для одержання компактних напівфабрикатів з титанових порошків; оцінка механічної та корозійної стійкості деталей, отриманих за розробленою технологією; застосування розробленої технології в серійному технологічному процесі.

МАТЕРІАЛИ, МЕТОДИКА І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Порошки титану є вихідною сировиною для реалізації перспективної технології одержання напівфабрикатів, з яких можуть бути виготовлені різні деталі для атомної енергетики [21]. Вони є основною складовою, що визначає як властивості виробів, що виготовляються з них, так і їх собівартість. У зв'язку з цим до них пред'являється комплекс вимог як з технічної, так і з економічної сторін. Наприклад, вартість порошків сферичної форми, одержаних методом диспергування розплаву металу, може на порядок перевищувати вартість порошків, одержаних шляхом дроблення й розмолу твердих матеріалів. У зв'язку з цим, враховуючи концепцію, спрямовану на розробку нової, ресурсозберігаючої технології одержання деформованих титанових напівфабрикатів методами

ПМ синтезу спечених напівфабрикатів, застосовували найбільш дешеві промислові термомеханічні порошки титану марки ПТ виробництва ДП «Запорізький металургійний дослідно-промисловий завод», ПАТ «Інститут титану». Випускається біля 28 марок порошків ПТ. З них для виробництва титану за хімічним складом, відповідним до марки ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91), придатні 13 марок з фракційним складом – 0,5+0,16 мм.

Відповідно до сучасних тенденцій розвитку реактора конструкційні матеріали повинні бути чистими. Домішки значно погіршують механічну корозію і радіаційні властивості і, отже, обмежують використання в експлуатації і проектуванні реакторів. Для більшості сплавів титану домішки мають істотний вплив на механічні властивості і, як наслідок, на споживчі характеристики. Титан повністю втрачає здатність до пластичної деформації і стає крихким, якщо він містить 0,003; 0,02 і 0,7 мас.% водню, азоту і кисню відповідно [22].

Виходячи із зазначених вимог для виробництва виробів, що працюють в атомній енергетиці, з порошку марок ПТ придатні фракції – (5,00+0,45) мм. При цьому фактично підходять тільки 3 марки порошків: ПТ-1-1, ПТ-2-1, ПТ-3-1 (табл. 1). Решта марок можуть стати вихідною сировиною для отримання порошку високої чистоти методами рафінування [23] і після цього використовуватись для виробництва виробів, що працюють в атомній енергетиці.

Таблиця 1

Хімічний склад використовуваного порошку ПТ (ТУ 14-10-026-98) і сплаву титану ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91), мас. %

Матеріал (фракція, мм)	Ti	Si	Fe	O	H	N	C	Σ інших домішок
ПТ-1-1 (-5,0+1,0), ПТ-2-1 (-1,0+0,63)	ос-но-ва	0,005	0,02	0,06	–	0,02	0,01	–
ПТ-3-1 (-0,63+0,18)	ос-но-ва	0,015	0,03	0,06	–	0,02	0,01	–
ВТ1-0	ос-но-ва	0,100	0,25	0,20	0,010	0,04	0,07	0,3

Марка ПТ-2-1 повністю аналогічна за хімічним складом марці ПТ-1-1, а розмір часток може бути до 80 разів дрібніше (див. табл. 1), що при пресуванні призведе до меншої пористості. Таким чином, марку ПТ-1-1 рекомендовано застосовувати для виготовлення спечених заготовок з максимальною пористістю, а ПТ-3-1 – з мінімальною.

Достатньо вивчені деформації і руйнування титану ВТ1-0 [24, 25], також є дані з його радіаційного росту в умовах, що імітують реакторне

опромінення [26]. Тому з метою скорочення експериментів у порівнянні впливу характеристик деформованого і спеченого титану в якості матеріалу дослідження також обраний титановий сплав ВТ1-0. Оскільки дослідження планується проводити на титановому сплаві, який вказується як аналог серійного деформованого сплаву ВТ1-0, використовуються компоненти і технологія виготовлення, що повинні гарантувати необхідний хімічний склад.

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 два типи зразків. Перший тип – паралелепіпед розмірами 11×11×55 мм, зручний для проведення механічних і металографічних досліджень. Другий тип – циліндри діаметром 40 мм і висотою 60 мм, що використовувався для виготовлення кінцевих напівфабрикатів деталей для дослідження масштабного фактора впливу на властивості досліджуваних титанових сплавів.

Для реалізації напрямків були розроблені технологічна схема і оснащення; відпрацьовані пресування, усадки; проведено конструкторсько-технологічний розрахунок, розрахунок міцності, геометрії і кінематичний розрахунок матриці. Розроблене універсальне оснащення дозволяє виготовляти як цілісні, так і порожнисті пруткові заготовки (рис. 1).

Реалізовані наступні напрямки:

1) синтез + зварювання:

– отримання довгомірних пруткових великогабаритних заготовок серійних розмірів (діаметром 40...60 мм);

– отримання трубних заготовок для запірної арматури та інших порожнистих виробів;

2) синтез + зварювання + деформування:

– отримання пруткових заготовок з подальшим куванням у рамках робіт з імпортозаміщення.

Була отримана партія заготовок кількістю 120 шт. Після цього заготовки були виготовлені методом зварювання в твердій фазі, механічно оброблені для набуття кінцевого вигляду деталі.

Для оцінки оброблюваності на пруткових напівфабрикатах нарізали різьбу шляхом токарної обробки.

З трубних заготовок виготовлено корпуси кранів дискових (ГОСТ 21345-2005), кульових (ТУ У 29.1-32638366-001:2005) та втулку валу мулового насосу 28/2 (впресовану в титанове кільце насосу і зварену з ним) розмірами, мм: зовнішній \varnothing 53, внутрішній – 32, висота 37, та передано на корозійні дослідження.

Науково-дослідне та дослідно-промислове випробування крану проводилося:

– на герметичність при тиску 5 МПа;

– в агресивних середовищах 32% HNO_3 ,

10% H_2SO_4 , 20% HCl у протоці при кімнатній температурі протягом 170 год;

– на газоочисних спорудах в якості крана відбірника проб на баку скрубера першого ступеня очистки в агресивному середовищі гіпохлориду кальцію $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ (відпрацьоване вапняне молоко) під напором при температурі навколишнього середовища із напрацюванням 1008 год.



Рис. 1. Спечені формовки під пруток суцільного перетину (а) і під трубу (б)

Після досліджень титанових кранів їх було демонтовано і розібрано, а деталі піддані огляду та оцінці для визначення наявності та ступеню корозійного зношування.

Дослідження втулки валу проводилися на дільниці біохімічного очищення. Після експлуатації деталі із напрацюванням 500 год насос демонтовано і розібрано, а дефекти деталі піддані оцінці.

Для оцінювання економічної доцільності деталі виготовлялися за традиційною і дослідною технологіями:

1) губка → дроблення і розсівання → виготовлення електрода, що витрачається → триразовий процес (вакуумно-дуговий переплав + обточування злитка) → кування попереднє → порізка → остаточне кування → обточування → пруток;

2) губка → дроблення → розсівання → пресування → спікання → зварювання → обточування → кування → обточування → пруток → фінішна обробка → виріб.

Перед виготовленням виробів методом порошкової металургії з метою видалення вологи проводили сушку порошку марки ПТ-3-1 при температурі 300 °С протягом 30...50 хв. Порошок у подальшому подавали пресуванню і спіканню.

Формоутворення проводили на пресі ДБ 2432 А із зусиллям пресування приблизно 700 МПа. Це зусилля обране, як достатнє для формування в структурі пор малих розмірів, також це зусилля дозволяє знизити їх кількість. Більші зусилля призводять до незначного зменшення пористості, але можуть викликати значне зниження ресурсу оснащення і машин.

Сушку та спікання проводили в лабораторній вакуумній електропечі СНВЕ – 1.3.1/16. Атмосфера – вакуум 13,3 Па. Режим спікання був наступним: швидкість нагрівання $V_{\text{наг}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{хв}$, ізотермічна витримка $(1250 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ впродовж 180 хв.

Спечені заготовки проходили сортування і калібрування. Сортування зразків полягало у візуальному виявленні поверхневих дефектів після спікання. До поверхневих дефектів відносили: викривлення, відхилення від форми, відколи, тріщини, розкришування поверхонь. При їх наявності зразок відбраковувався.

Деформаційна обробка спечених заготовок з метою зменшення структурних складових і усунення залишкової пористості здійснювалася методами кування у відкритих штампах при сумарному обтисненні 15...20% за режимами для литого технічного титану – нагрів 25 хв при температурі: початкова 870...950 $^\circ\text{C}$, кінцева 780...800 $^\circ\text{C}$ [27]. Після деформування поковки піддавали абразивному очищенню для видалення твердої поверхневої плівки і окислів.

Морфологію частинок порошків досліджували на стереографічному мікроскопі Leica PM L82 і растровому електронному мікроскопі РЕМ-106И у вторинних електронах. Порошки фіксувалися на предметному столику вуглецевою струмопровідною клейкою стрічкою, що дозволило вивчити хімічний склад і провести вимір лінійних розмірів окремих частинок у режимі високого вакууму. Морфологію частинок порошків, оцінку мікроструктурних складових та пористість зразків визначали за результатами аналізу мікрофотографій в системі ImagePro Plus за стандартними методиками ГОСТ 1778-70, ДСТУ ISO2738:2009.

Випробування формовок при статичних навантаженнях і розрахунок значень межі міцності проводили відповідно до ГОСТ 1497-84. Зразки для визначення механічних властивостей вирізали із заготовок механічною обробкою. Дослідження структури і фактографічний аналіз зламів виконували з використанням оптичного мікроскопа НЕОРНОТ і растрового електронного мікроскопа фірми JEOL у вторинних електронах.

Випробування на розтягання виконували на сервогидравлічній машині INSTRON 8802 при кімнатній температурі. База екзотензометра становила 25 мм. У процесі випробувань деформацію робочої частини зразка контролювали з точністю $\pm 1 \text{ мкм}$. Точність виміру напружень у робочому перетині зразка становила $\pm 3 \text{ МПа}$. Показання екзотензометра і пружного динамометра відцифровували з дискретністю 0,01 с.

Ударну в'язкість визначали за результатами випробувань на ударний вигин відповідно до ГОСТ 9454-78 на маятниковому копрі IMP-460J фірми INSTRON, оснащеного цифровою системою збору інформації. Використовували зразки відповідні до типу 1 (з U-подібним концентратором). Дослідження проводили для партії зразків, оброблених за однаковими режимами.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ І ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

При дослідженні морфології частинок порошку, застосовуваного для синтезу спечених заготовок, встановлено, що вони мали розвинену поверхню (рис. 2), характерну для титану губчастого, що позитивно позначається на здатності до пересування та наступного спікання. Порошок характеризується неправильною, кутастою і осколковою формою.

Після пресування і спікання для зразків характерна складна поверхня пор, у більшості неправильної форми. Це є наслідком форми використовуваного порошку. Особливості форми пор визначили сфери застосування деталей з порошку: конструкційні, працездатні в діапазоні значень до 300 $^\circ\text{C}$ у холодних частинах реактора, в місцях, що не приймають, не випробовують ударні і циклічні навантаження.

Механічними випробуваннями встановлено (табл. 2), що рівень міцностних характеристик спечених формовок знаходився на рівні литого титану ВТ1-0 [28]. Усі випробувані зразки мали низькі значення характеристик пластичності. У процесі випробувань шийка на всіх зразках практично не утворювалася. Аналіз фрактограм руйнування зразків показує (рис. 3), що злам спечених зразків носить крихкий характер.

Таблиця 2

Механічні властивості спечених зразків у різних станах

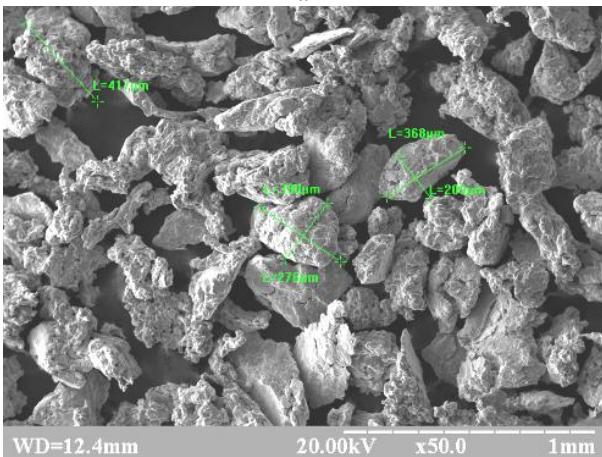
Стан зразка	Границя міцності $\sigma_{\text{в}}$, МПа	Умовна границя плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне		Ударна в'язкість KCU_2 , Дж/см ²
			видовження δ , %	звуження ψ , %	
Спечений	340,3	285,5	8,4	19,1	107,8
Спечений +деформування	410,8	289	14,8	27,3	131,0
Литий	350	300	17,0	37,0	120,2
Горячекатаний ГОСТ 26492-85	≥ 345	–	$\geq 15,0$	$\geq 40,0$	$\geq 70,0$

Враховуючи, що пористість для некомпактних тіл у значній мірі визначає рівень їх міцності, можна стверджувати, що встановлені значення механічних характеристик добре корелюють із результатами дослідження особливостей ущільнення. Спостерігали значні зміни характеристик міцності і пластичності після деформування, враховуючи, що робоча зона циліндричного зразка для випробувань на розтягання відповідала центральній зоні призматичної заготовки, підданої штампуванню, і є наслідком ступеня ущільнення центральної зони заготовки.

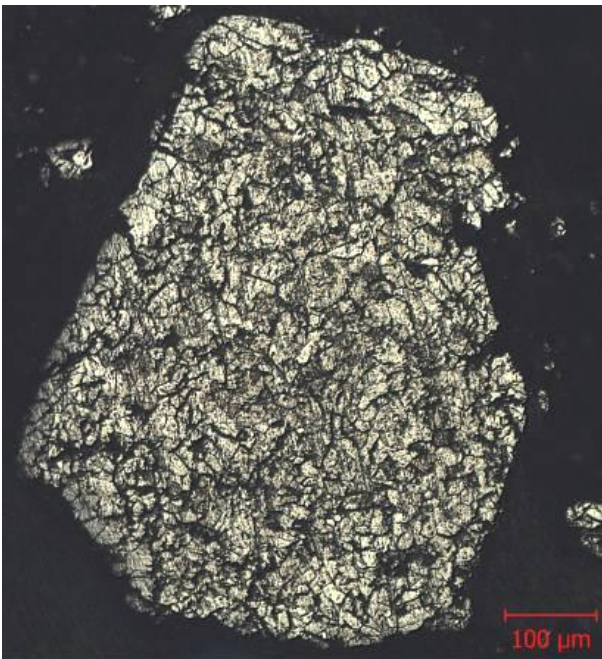
Зовнішній огляд деформованих напівфабрикатів (рис. 4) не виявив на поверхні слідів тріщиноутворення.



a



б

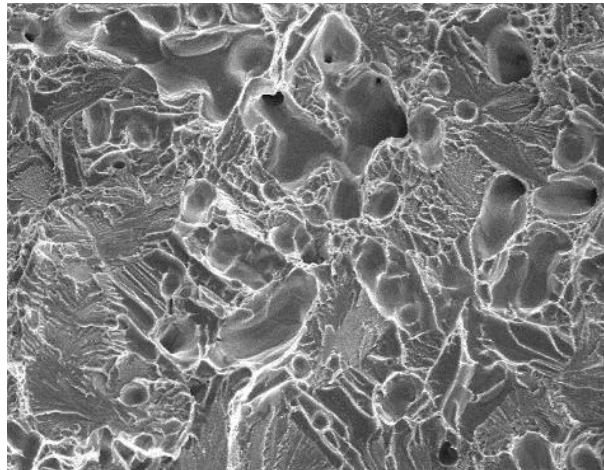


в

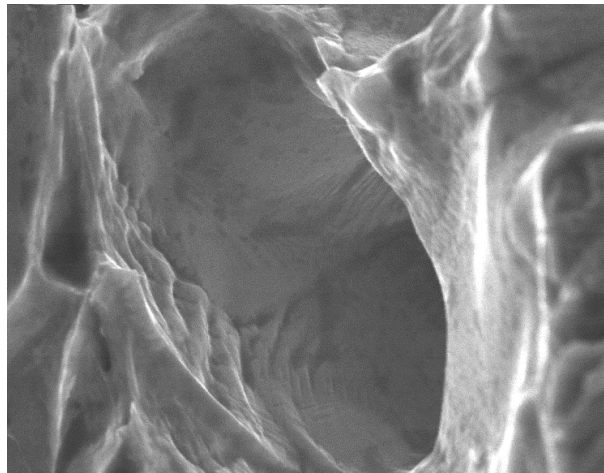
Рис. 2. Матеріали для синтезу спечених заготовок: титанова губка (а), загальний вид (б) і макроструктура частинки порошку титану (в)

У процесі штампування ущільнюється весь поперечний переріз спечених з металевих порошків заготовок. Відзначається зменшення середнього

розміру, кількості пор та їх повне заліковування. Рівень пористості знизився до 1%. Рівень механічних властивостей зразків зі спечених заготовок, підданих штампуванню, значно підвищується і відповідає властивостям пруткового, серійного сплаву ВТ1-0 (ГОСТ 26492–85). Знижені пластичні характеристики пояснюються відпаленим станом прутків. При відпалі спечених і продеформованих заготовок їх пластичність буде відповідати даним ГОСТ 26492–85.



x1000



x5000

Рис. 3. Фрактограми руйнування спечених зразків



Рис. 4. Спечені заготовки після кування

Таким чином, деформування є ефективним методом при обробці деталей, отриманих методами ПМ з технічного титану.

Оброблюваність дослідного прутка (рис. 5) нічим не відрізнялася від серійних пруткових напівфабрикатів. Якість різьблення, а також формоутворення стружки також були аналогічні прутковим напівфабрикатам. Заготовки мали гарну токарну і фрезерну обробку (рис. 6).

Таким чином, показана можливість реалізації в промислових масштабах виробництва напівфабрикатів зі спечених титанових сплавів. Це дає підставу для більш широкого застосування

спечених титанових сплавів у вигляді зварних виробів довгомірних напівфабрикатів, забезпечуючи впровадження титану в нові масштабні області техніки.



Рис. 5. Пруткова заготовка $\varnothing 40$ мм і довжиною 700 мм отримана методами ПМ і зварювання

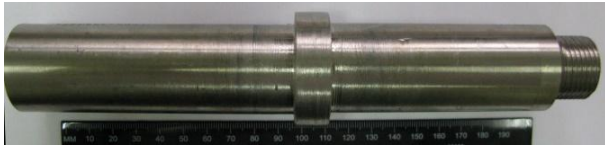
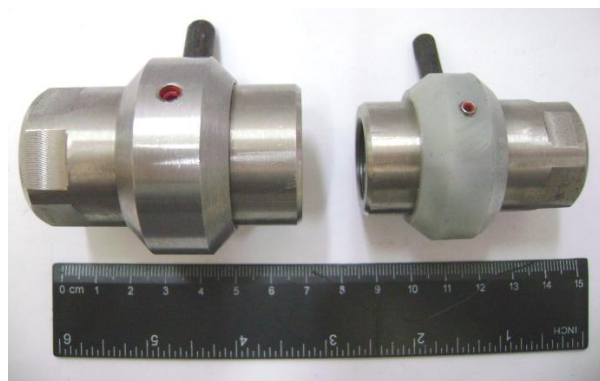


Рис. 6. Пруткова заготовка $\varnothing 40$ мм отримана на основі методу ПМ і зварювання після механічної обробки різанням

Під час проведення науково-дослідних та дослідно-промислових випробувань в агресивних середовищах титанових кранів (рис. 7), вироблених з дослідного матеріалу, показано, що:

- випробування герметичності показали повну непроникність кранів;
- корозійна стійкість матеріалу практично не поступається раніш використовуваному деформованому сплаву ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91).



а



б

Рис. 7. Корпуси кранів: дискових (а) і кульових (б)

Аналіз виробництва деталі показав його високу матеріалоемність. Використання методу ПМ дозволить істотно знизити втрати матеріалу. Економічний ефект від впровадження результатів роботи на підприємствах сягає 200...400 грн/кран.

Даний ефект забезпечується низькою сумарною

ресурсовитратністю внаслідок застосування порошків титану, одержуваних на вітчизняних виробництвах, а також отримання заготовок, близьких за формою до готових деталей, що забезпечує високий коефіцієнт використання матеріалу.

Таким чином, показана технологічна і економічна доцільність виготовлення напівфабрикатів і готових виробів зі спечених титанових сплавів із застосуванням методів зварювання для використання в атомній енергетиці.

ВИСНОВКИ

1. Застосування методів ПМ для виробництва заготовок для ядерної енергетики є перспективним напрямком через регіональні особливості сировинної та споживчої бази титану.

2. Порошки титану, одержувані з титанової губки виробництва Запорізького металургійного дослідного заводу, можуть бути використані як основа для одержання якісних напівфабрикатів титанових сплавів.

3. Показана принципова можливість отримання напівфабрикатів титанових сплавів методом ПМ із забезпеченням необхідної згідно ГОСТ 19807-91 концентрації елементів.

4. Отримано механічні властивості дослідного спеченого сплаву типу ВТ1-0, близькі до аналогічних литого сплаву ВТ1-0. При цьому дослідний сплав має до 7...9% залишкової пористості і не проходив додаткової деформаційної обробки.

5. Виготовлення виробів із заготовок спеченого титанового сплаву можливо, однак пори в структурі спеченого матеріалу можуть знизити ресурс виробів. Тому ці деталі застосовуються в місцях, що не випробовують ударні і циклічні навантаження. Запропоновано використовувати спечені заготовки для усунення даного недоліку.

6. Застосування деформування дозволяє отримати заготовки з механічними властивостями, відповідними серійним прутковим заготовкам.

7. Розроблений проект технології виготовлення зі спечених титанових напівфабрикатів сплаву типу ВТ1-0 ГОСТ 19807-91 із застосуванням зварювання забезпечує отримання корпусів кранів: дискових (ГОСТ 21345-2005), а також кульових (ТУ У 29.1-32638366-001:2005).

8. На підставі проведених науково-дослідних робіт з оцінки корозійної стійкості виробів з титанових сплавів типу ВТ1-0 (ГОСТ 19807-91), отриманих методом ПМ із застосуванням зварювання, вважати доцільним використання розробленої технології для виготовлення довгомірних напівфабрикатів та деталей складної форми і рекомендувати її до впровадження. Планується як доповнення до ТУ У 27.4-00201081-001-2003 «Елементи фільтрувальні з титану».

9. Пруткові напівфабрикати, отримані методами порошкової металургії і зварювання, рекомендовані для заміни імпорتنних пруткових напівфабрикатів і виготовлення корпусів кранів.

10. Подальші дослідження отримання

напівфабрикатів для ядерної енергетики необхідно проводити в напрямках: аналізу впливу фракційних складів порошків на структуру та властивості формовок; вивчення радіаційної стійкості; мінімізації часу зниження наведеної активності і т. п.

БІБЛОГАФІЧНИЙ СПИСОК

1. О. Бакай, В. Бар'яхтар. Про нагальні проблеми атомної енергетики України // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2017, №4(110), с. 107-110.

2. Nuclear Power in Ukraine Available at: <http://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/ukraine.aspx> (accessed 08.11.2017).

3. В.А. Белоус, Г.И. Носов, И.О. Клименко. Упрочнение титановых сплавов ионно-плазменным азотированием // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2017, №5(111), с. 73-82.

4. В.А. Білоус, В.М. Воєводін, В.М. Хороших, Г.І. Носов, В.Г. Маринін, С.О. Леонов, В.Д. Овчаренко, В.І. Коваленко, А.А. Комарь, А.С. Купрін, Л.О. Шпагіна. Створення експериментального обладнання і основних технологічних прийомів отримання кавітаційно-стійких захисних покриттів на робочих поверхнях лопаток парових турбін з титанового сплаву ВТ6 з метою заміщення імпорту аналогічної продукції // *Наука та інновації*. 2016, т. 12, №4, с. 29-39.

5. А.М. Паршин, О.Э. Муратов. О применении титановых сплавов для корпусов водо-водяных реакторов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2005, №3(86), с. 179-181.

6. М.Л. Коцарь, В.И. Никонов, Д.С. Анищук, С.Г. Ахтонов, С.Ю. Заводчиков, А.Г. Зиганшин, В.Г. Смирнов, М.Г. Штуца. Йодидный титан – перспективный материал для получения сплавов с памятью формы и водородостойких сплавов теплообменного оборудования ЯЭУ // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2012, №5(81), с. 93-97.

7. Пат. RU 2351671 C22C14/00. Титановый сплав для трубопроводов и трубных систем теплообменного оборудования атомной энергетики / В.А. Межонов, С.С. Ушков, О.А. Кожевников, В.А. Семенов, И.А. Повышев. Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» (ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей») №2007116912/02; заявл. 04.05.2007, опубл. 10.04.2009.

8. Пат. RU 2367697 C22C14/00. Титановый сплав для реакторного оборудования атомной и термоядерной энергетики / В.А. Межонов, С.С. Ушков, О.А. Кожевников, И.А. Повышев. Федеральное государственное унитарное

предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» (ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей») №2008106728/02; заявл. 21.02.2008, опубл. 20.09.2009.

9. Пат. RU 2391426 C22C14/00. Титановый сплав для силовых крепежных элементов / В.А. Межонов, А.М. Федоров, О.А. Кожевников, И.А. Повышев, К.Д. Хромушкин. Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» (ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей») №2009100340/02; заявл. 11.01.2009, опубл. 10.06.2010.

10. В.М. Ажажа, П.Н. Вьюгов, С.Д. Лавриненко, Н.Н. Пилипенко, А.Ф. Болков, А.М. Лахов, К.А. Линдт, А.П. Мухачев, В.И. Попов. Электронно-лучевая плавка титана, циркония и гафния // *Вопросы материаловедения*. 2002, №6(82), с. 95-99.

11. С.С. Ушков, О.А. Кожевников. Опыт применения и значение титановых сплавов для развития атомной энергетики России // *Вопросы материаловедения*. 2009, №3(59), с. 172-187.

12. С.С. Ушков. Оценка перспективы развития рынка сбыта титановых материалов // *Атомная стратегия*. 2007, №27, с. 23.

13. Б.Е. Патон, Н.П. Тригуб, С.В. Ахонин. Перспективы использования титана в атомной энергетике Украины // *Современная электрометаллургия*. 2006, №2, с. 23-26

14. И.И. Иванова, А.Н. Демидик. Ферритные дисперсно-упрочненные стали для горячей зоны реакторов на быстрых нейтронах // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2001, №4(80), с. 65-68.

15. В.С. Агеев, А.А. Никитина, М.В. Леонтьева-Смирнова, М.М. Потапенко, Б.В. Сафронов, А.П. Чуканов, В.В. Цвелев, В.В. Сагарадзе. Развитие работ по ДУО ферритно-мартенситным сталям для инновационных ядерных реакторов на быстрых нейтронах // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Материаловедение и новые материалы»*. 2008, №1(70), с. 47-52.

16. Р.Н. Ястребинский, В.И. Павленко, Н.И. Черкашина, О.В. Куприева. Исследование характеристик ослабления нейтронного и гамма-излучений композициями на основе гидрида титана // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2015, №2(96), с. 84-88.

17. В.Е. Панин, Т.Ф. Елсукова, Ю.Ф. Попкова, Ю.И. Почивалов. Роль локальной кривизны поверхностного слоя поликристаллов титана в зарождении и развитии усталостного разрушения // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2015, №2(96), с. 148-153.

18. L.S. Ozhigov, V.A. Belous, V.I. Savchenko, G.I. Nosov, V.D. Ovcharenko, G.N. Tolmachova, A.S. Kuprin, V.S. Goltvyanitsa. Role of surface layer nanosructuring in improving mechanical and corrosion

properties of reactor materials // *PAST. Series "Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science"*. 2017, N 2(108), p.168-172.

19. С.Н. Братушка, Л.В. Маликов. Ионно-плазменная модификация титановых сплавов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2011, №6(19), с. 126-140.

20. С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. *Порошковая металлургия*. М.: «Металлургия», 1980, 496 с.

21. S. Axelsson. Surface Characterization of Titanium Powders with X-ray Photoelectron Spectroscopy [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/164534.pdf> (accessed 18.11.2017).

22. М.М. Pylypenko, S.D. Lavrinenko. Pure vanadium and titanium for low activation alloys // *PAST. Series "Vacuum, Pure Materials, Superconductors"*. 2016, N 4(104), p. 49-53.

23. Г.А. Колобов. *Титан вторичный*. Запорожье: ЗГИА, 2017, 272 с.

24. Е.В. Коллингз. *Физическое металловедение титановых сплавов* / Пер. с англ. М.: «Металлургия», 1988, 223 с.

25. У. Цвиккер. *Титан и его сплавы* / Пер. с немецкого. М.: «Металлургия», 1979, 512 с.

26. В.М. Грицина, С.П. Клименко, А.А. Пархоменко, Т.П. Черняева. Радиационный рост титанового сплава ВТ1-0 при протонном облучении // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2016, №2(102), с. 12-16.

27. *Справочник металлста* / Под ред. Н.С. Ачеркана. Т. 2. М.: «Машиностроение», 1965, 496 с.

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

Статья поступила в редакцию 24.11.2017 г.

СПЕЧЕННЫЕ ТИТАНОВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

А.Е. Капустян, А.В. Овчинников, Т.Б. Янко

Рассмотрены возможности использования спеченных титановых сплавов в качестве конструкционных материалов в атомной энергетике; марки порошков титана, которые промышленно выпускаются в Украине и пригодны для получения изделий для атомной энергетике. Показаны принципиальная возможность получения полуфабрикатов титановых сплавов методом порошковой металлургии с обеспечением необходимой концентрации элементов и технология изготовления полуфабрикатов и готовых изделий из спеченных титановых сплавов. Подтверждено высокое качество полуфабрикатов титановых сплавов, полученных с использованием технологий порошковой металлургии и сварки. Показано, что применение разработанной ресурсосберегающей интегрированной технологии позволит снизить стоимость конечных изделий без снижения механических характеристик, а также зависимость Украины от внешних поставщиков полуфабрикатов и готовой продукции из титана и его сплавов.

SINK TITANIUM ALLOYS FOR NUCLEAR ENERGY

O.Ye. Kapustian, O.V. Ovchynnykov, T.B. Ianko

The possibility of using sintered titanium alloys as structural materials in nuclear power engineering is considered; brands of titanium powders, which are manufactured industrially in Ukraine, suitable for obtaining products for nuclear power. The principal possibility of obtaining semi-finished titanium alloys by the method of powder metallurgy is shown, with the necessary concentration of elements. The technology of manufacturing semi-finished products and finished products from sintered titanium alloys is shown. The high quality of semi-finished titanium alloys obtained using powder metallurgy and welding technologies was confirmed. It is shown that the application of the developed resource-saving integrated technology will allow reducing the cost of final products without reducing mechanical characteristics, as well as Ukraine's dependence on external suppliers of semi-finished products and finished products from titanium and its alloys.