

РОЗДІЛ III ПРОЦЕСИ ОБРОБКИ ТИСКОМ У МЕТАЛУРГІЇ

УДК 621.762.4

DOI: 10.37142/2076-2151/2023-1(52)126

Гогасв К. О.
Воропаєв В. С.
Подрезов Ю. М.
Мінаков М. В.
Вдовиченко О. В.

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИМЕТРИЧНОЇ ПРОКАТКИ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРОШКОВИХ ТИТАНОВИХ СТРІЧОК

Для відпрацювання оптимальних технологічних режимів отримання титанових стрічок з максимальною сировою міцністю при застосуванні схеми асиметричної прокатки, використано комплексний підхід, який передбачає дослідження впливу кількох технологічних факторів: схеми деформування (симетрична та асиметрична прокатка), температури прокатки, зусилля на валках та захисного середовища. Проведені дослідження показали, що використання методу асиметричної прокатки дозволяє значно підвищити механічні властивості титанових стрічок в порівнянні з симетричною прокаткою завдяки зсувній компоненті деформації, яка покращує умови контактоутворення на міжчасткових границях. Оптимальними умовами асиметричної прокатки титанових стрічок слід вважати температури прокатки 200–400 °С та притискне зусилля ~100 кН. За цих умов стрічки демонструють найвищу сирову міцність ~ 800 МПа та динамічні характеристики, що наближається до таких властивостей компактного титану. Після прокатки при 200 °С стрічки мають найбільшу твердість $H_{\mu} = 200\text{--}215$ МПа. Цей показник значно вищий, ніж у рекристалізованого титану, але суттєво поступається значенням мікротвердості, що отримані на зразках з титану, продеформованих методами інтенсивної деформації. Відносно низька твердість а також незмінність геометричних розмірів стрічок після різних режимів деформування, свідчить про локальний характер інтенсивного зсуву на міжчасткових границях, який посилює процес контактоутворення. Використання захисної атмосфери дозволяє підвищити сирову міцність та пластичність, хоча стрічки залишилися відносно крихкими, їх максимальна деформація до руйнування не перевищувала 1,5 %.

Ключові слова: асиметрична прокатка, температура, притискне зусилля, сира міцність, пластичність, міжчастковий контакт, локалізований зсув.

Асиметрична прокатка (АП), яку зараховують до методів інтенсивної пластичної деформації (severe plastic deformation, SPD) дозволяє підвищити якість стрічок з порошків за рахунок активізації зсувної компоненти деформації. У попередніх роботах [1–3] автори продемонстрували, що в стрічці, отриманій асиметричною прокаткою з титанового порошку, крім ефектів збільшення щільності [4, 5] та суттєвого зниження зусилля на валках при однаковій величині проміжку між валками [6, 7] в декілька разів зростають модуль пружності та міцність на згин, що свідчить про утворення міцного зв'язку між частинками порошку.

Формування контакту за такої схеми ущільнення є наслідком дії декількох фізико-механічних процесів, кожен з яких може сприяти як покращенню когезії, так і деструкції міжчасткової границі і утворенню деформаційної субструктури в приповерхневому шарі за рахунок інтенсивного зсуву, що сприяє контактоутворенню і зміцненню матеріалу. Але перевищення критичної напруги може привести до руйнування деформаційної структури. Значне підвищення температури в зоні зсуву також може сприятливо впливати на контактоутворення за рахунок зменшення опору деформації, але при цьому підвищується схильність до окислення. Підвищення щільності, яке є характерною ознакою використання методів SPD [8–10], безумовно, повинно сприяти підвищенню сирової міцності, Але і в цьому випадку слід уникати існування площинних пор, наявність яких знижує механічні властивості і сприяє проникненню

кисню у внутрішні об'єми стрічок, що піддаються АП. За умов оптимізації всіх перерахованих факторів слід очікувати суттєвого підвищення сирової міцності титанових стрічок.

Метою роботи є відпрацювання оптимальних технологічних режимів отримання титанових стрічок з максимальною сировою міцністю при застосуванні схеми асиметричної прокатки. Для вирішення цієї проблеми в роботі використовується комплексний підхід, який передбачає дослідження впливу кількох технологічних факторів: схеми деформування (симетрична та асиметрична прокатка), температури прокатки, зусилля на валках та захисного середовища.

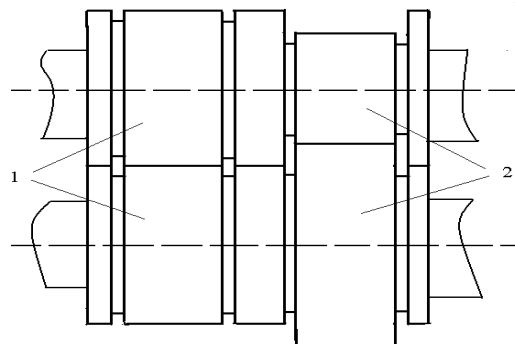
Для відпрацювання режимів прокатки використовували порошок титану ПТЕС. Фракційний состав та наявність домішок наведені в табл. 1

Таблиця 1

Фракційний состав порошку та наявність домішок

Гранулометричний склад	Основа	Масова доля домішок, % не більше					
		залізо	хлор	азот	кисень	вуглець	кремній
-0,63 + 0,18	титан	0.06	0.06	0.03	0.06	0.02	0.02

Прокатку проводили на стані ДУО, використовуючи калібровані валки, які дають можливість здійснити прокатку як за симетричною, так і асиметричною схемами за однакового зазору між валками (рис. 1), коефіцієнт неузгодженості при асиметричній прокатці становить 1,25.



1 – калібр для симетричної прокатки, 2 – калібр для асиметричної прокатки

Рис. 1. Схема калібровки валків стана ДУО

Збільшення нормальних контактних напруг досягали попереднім стиском валкового вузла натискними гвинтами. Відлік попереднього стиснення вели від нульового зазору між валками з кроком 0,5 обороту гвинта. Фіксацію загального зусилля прокатки здійснювали за допомогою встановлених під натискними гвинтами месдоз. Для вивчення впливу силових факторів (зусиль прокатки) при зміні режимів прокатки на щільність та механічні властивості порошкового прокату була створена комп'ютерна система фіксації зусилля прокатки. З метою досягнення максимальної щільності прокату та максимального фізичного контакту між частинками титану проводили прокатку як при нульовому зазорі між валками, так і при додатковому навантаженні на валках. Додаткові зусилля склали 50, 105 та 135 кН.

Однакові об'єми титанового порошку перед кожною прокаткою насипали в кварцову трубу, запаяну з одного боку, та нагрівали до необхідної температури в атмосфері аргону. Для нагрівання порошку використовувалася електропіч з регулюванням температури нагрівання (рис. 2а). З метою обмеження впливу процесу окислення подальшу прокатку також проводили в атмосфері аргону (рис. 2б) Для порівняння в декількох експериментах нагрів порошку проводили без застосування захисної атмосфери.



Рис. 2. Піч нагріву (а) и бункер (б) для прокатки порошку титана в аргоні

Сира міцність σ_p визначалась за результатами випробувань на триточковий вигин зразків розмірами $h \times 4 \times 40$ мм, де h – висота стрічки. Модуль, E , пружності визначався за результатами випробувань на чотириточковий згин або акустичним методом. Дослідження мікротвердості, H_v , проводили на приладі ПМТ-3 з зусиллям на індентор 20 г. Випробування проводили на боковій поверхні стрічки. Значення мікротвердості визначалось як усереднення від 25 занурень за умови, що відстань між відбитками більше, ніж в 5 разів, перевищує розмір відбитку

Наявність та вміст пошкоджень, пов'язаних з порошковим генезисом (площинні пори та технологічні тріщини) досліджувалось методами резонансної механічної спектроскопії [11]. В роботі визначались параметри резонансної спектроскопії, які є чутливими до вище зазначених пошкоджень. Динамічні характеристики пружності та внутрішнього тертя зразків визначали в умовах резонансних поперечних коливань за першою модою консольно закріпленого стрижневого зразка. Зразок після прокатки закріплювали одним кінцем в фіксуючому пристрої, встановленому на рухомому столі електродинамічного вібростенду типу ВЭДС-200 (рис.3).

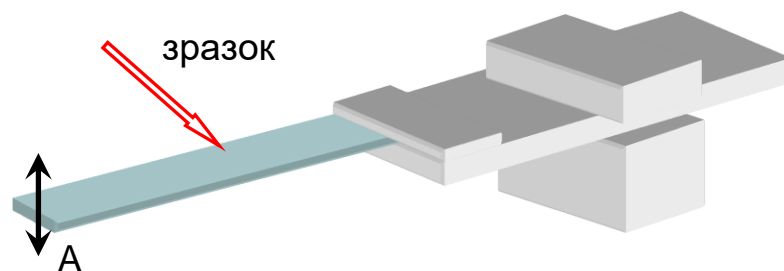


Рис. 3. Схема закріплення зразка для дослідження динамічних характеристик

Коливання збудовували в діапазоні частот, близькому до попередньо оціненого значення резонансної частоти коливань зразка за першою модою f_c , який для досліджених зразків становив 150...450 Гц. Частоту резонансу визначали за результатами спостережень за амплітудою коливань A кінця консольно закріпленого зразка. Резонансну криву будували за визначеними за допомогою вимірювального перетворювача переміщень або вимірювального мікроскопу амплітудами коливань вільного кінця зразка A на частотах збудження, близьких до частот

відповідного резонансу. Якість контакту визначалась згідно методології, що запропонована в роботі [12] за даними про зміну декременту коливань δ та зміну коефіцієнта спотворення форми резонансної кривої S_f . Декремент коливань експериментальної установки не перевищував 0,1 %

Результати експериментів. Вплив схеми прокатки

З теорії прокатки порошків [13] відомо, що епюра контактної нормальної напруги при прокатуванні металевих порошків має куполоподібну форму, близьку до трикутної, з максимумом, що знаходиться в районі нейтрального перерізу. Під час деформування зберігається симетричний розподіл напруг та деформацій. Випередження на обох валках однакове і зі збільшенням обтискання випередження збільшується. При вивченні процесу асиметричної прокатки порошкових матеріалів у всіх випадках випередження фіксується лише з боку валка меншого діаметру [4]. Основна відмінність між симетричною та асиметричною прокаткою порошкових матеріалів добре видно на рис. 4 [5].

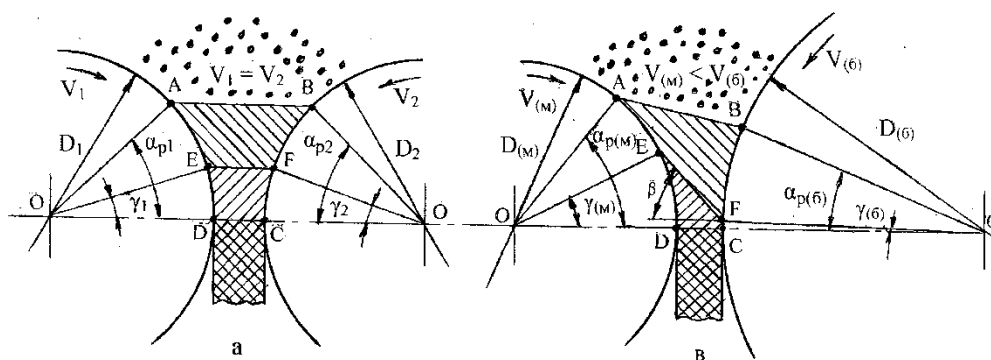


Рис. 4. Нейтральний переріз EF при симетричній (а) та асиметричній прокатці (в) порошкового матеріалу $D_1 = D_2$; $D(6) > D(M)$; $\alpha_{p1} = \alpha_{p2}$; $\gamma_1 = \gamma_2$; $\alpha_p(6) < \alpha_p(M)$; $\gamma(6) < \gamma(M)$; ABFE – зона відставання; EFCD – зона випередження

При симетричній прокатці порошкових матеріалів (рис. 4, а) зміна кутових параметрів на обох валках відповідає їх дзеркальному відображенню, а площина розділу зон відставання та випередження EF паралельна площині ODCO, що проходить через лінії центрів валків.

В роботі [7] було встановлено, що при асиметричній прокатці зі збільшенням неузгодженості окружних швидкостей відбувається поворот перерізу EF на кут β до перерізу ODCO (рис. 4, б). При такому повороті значно активізується зсувна деформація частинок порошку під тиском валків і зменшуються розтягуючі напруження. Чим більший кут β , тим активніші зсувні деформаційні процеси в осередку деформації. До того ж, спрямовані в різні сторони сили тертя по дугах контакту ED і BF створюють передній та задній натяг, сили тертя блокують одне одного і зменшують загальний тиск на валки. З наведеної схеми зрозуміло, що зсув відбувається в напрямку прокатки.

Локальний зсув в приконтактній зоні дозволяє реалізувати інтенсивну зсувну деформацію, завдяки чому у найбільш деформованих ділянках досягається критична міра деформації, необхідна для реалізації когезії по механізму холодного зварювання. Загальна кількість таких ділянок значно збільшується при використанні спеціальних схем ущільнення, які базуються на активації зсувних схем деформації. В роботах М. Б. Штерна зі співавторами [8, 9], виконаних на міді та Я. Ю. Бейгельзімера [10] на титані, було показано, що ущільнення порошків з використанням схеми гвинтової екструзії дозволяє значно знизити кінцеву пористість пресовок саме завдяки реалізації зсувної компоненти деформації. У роботах [1–3] ми продемонстрували, що в стрічці, яка отримана асиметричною прокаткою титанового порошку, значно покращується якість контакту. Це проявляється в різкому зростанні (в декілька разів) модуля пружності та міцності на згин і свідчить про утворення міцного зв'язку між частинками порошку.

В табл. 2 наведено інформацію про фізико-механічні властивості отриманих стрічок. Ці дані підтверджують результати попередніх досліджень і можуть слугувати вихідною точкою для порівняльного аналізу впливу інших технологічних параметрів.

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості титанових стрічок отриманих симетричною та асиметричною прокаткою при кімнатній температурі без додаткового притискання валків

Схема прокатки	E, ГПа	σ_p , МПа	Пористість, %	h, мм	H $_{\mu}$	δ	C $_f$
Сим.	12,9	43,8	6,5	1,7	150	0,16	700
Асим.	25,0	91,9	4	1,6	175	0,05	100

З наведених даних видно що модуль пружності та сира міцність зросли практично втричі. Значна зміна акустичних параметрів свідчить про суттєве покращення якості контакту. Важливо, що значне покращення механічних властивостей не супроводжується суттєвим зменшенням пористості та кінцевої товщини стрічки. Незначна зміна твердості свідчить про те, що зсувна деформація відбувається переважно у вузькій приконтатній зоні.

Вплив зусилля прокатки

З метою досягнення максимальної щільності прокату та максимального фізичного контакту між частинками титану проводили прокатку як при нульовому зазорі між валками, так і при додатковому навантаженні на валках. Додаткове зусилля створювали за допомогою натискних гвинтів прокатного стану. Додаткові зусилля склали 50, 105 та 135 кН.

Зважаючи на те, що при використанні симетричної прокатки підвищення зусиль прокатки та зменшення зазору призводить до «перепресування» і викликає утворення тріщин, а в деяких випадках повну деструкцію смуги (рис.5), в подальших експериментах використовували тільки асиметричну прокатку.



Рис. 5. Руїнування порошкового прокату при використанні схеми симетричної прокатки

Узагальнені результати по впливу додаткового навантаження на зміну зусилля прокатки та щільність прокату наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Вплив додаткового навантаження на зміну зусилля прокатки та щільність прокату

Температура	20 °C			
Тип прокатки	Сим	Асиметрична		
Зус. притиску, кН	0	0	105	135
σ_p , МПа	43,8	91,9	277	263
ε , %	0,1	0,03	0,38	0,24
Порист.%	6,5	4	3,5	3
a, мм	1,7	1,6	1,5	1,45
H $_{\mu}$	150	175	185	190

Збільшення притискного зусилля значно підвищує сиру міцність стрічок. Її значення наближається до границі плинності рекристалізованого титану. Можливо, саме тому на діаграмі навантаження спостерігається ділянка пластичної деформації, яка в момент руйнування складає 0,3 %, що співставно з внеском пружної складової. Натомість, збільшення зусилля на валках практично не вплинуло на кінцеву товщину стрічки, спостерігається незначне зменшення пористості та підвищення мікротвердості.

За допомогою комп'ютерної системи фіксації зусилля прокатки було досліджено зміну зусилля на валках в процесі утворення порошкової стрічки. Характерні діаграми процесу деформування в координатах зусилля - час для стрічок що отримані асиметричною прокаткою з різним вихідним притискним зусиллям наведені на рис. 6. З наведених даних видно, що характер діаграм практично ідентичний. Максимальні значення деформуючого напруження збільшуються з підвищенням притискної сили, але переважний внесок в цей ефект вносить саме первинне притиснення. Тобто, покращення контакту при збільшенні притискного зусилля пов'язані з посиленням локальних зсувних процесів між окремими порошинками.

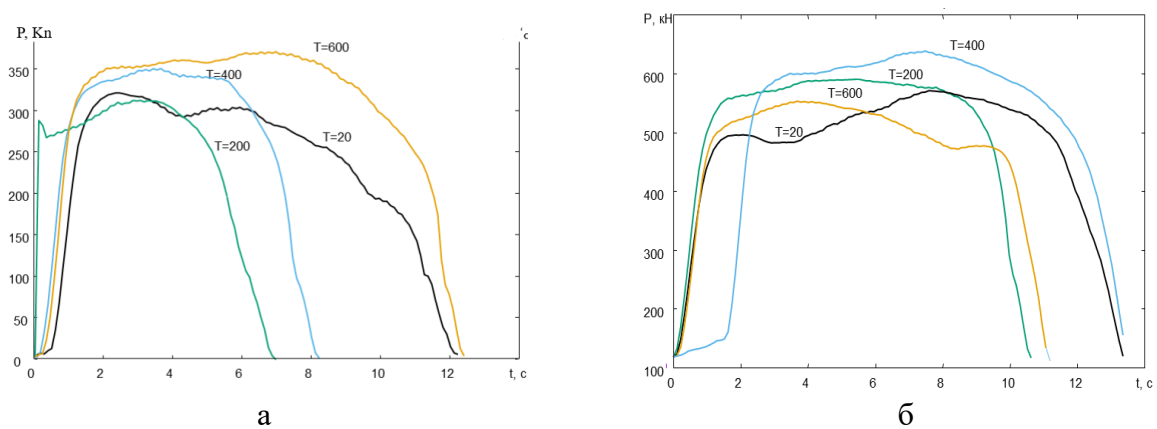
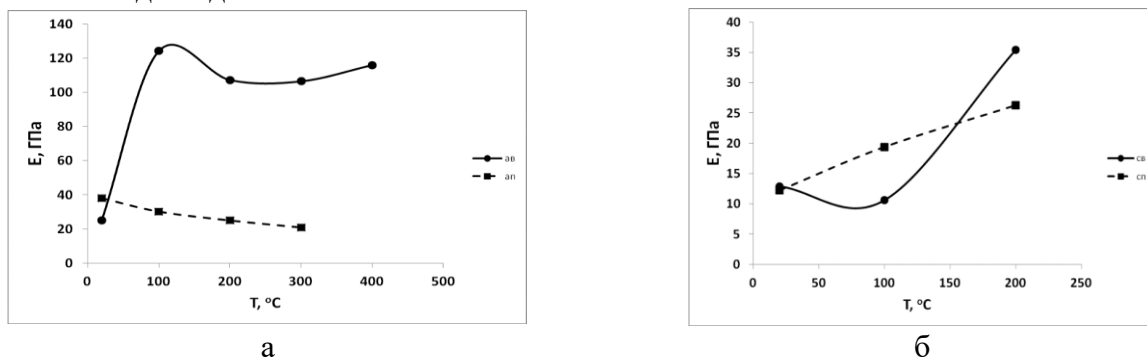


Рис. 6. Діаграми навантаження на валках при асиметричній прокатці в координатах зусилля-час для титанових стрічок, продеформованих при різних температурах з різним початковим притискним зусиллям; а - 0 кН, б - 135 кН.

Вплив температури деформування

Для коректного порівняльного аналізу впливу температури на формування досконалого контакту при симетричній та асиметричній прокатці експерименти проводились на повітрі без додаткового прижимного зусилля на валках. Температурні залежності модуля пружності та сирої міцності стрічок отриманих симетричною та асиметричною прокаткою наведені на рис. 7 та 8 відповідно.



а - асиметрична прокатка, б - симетрична прокатка

Рис. 7. Залежність модуля пружності від температури прокатки

Випробування вздовж (—) і поперек (- -) напрямку прокатки.

Після асиметричної прокатки при кімнатній температурі сира міцність втричі вища, ніж після симетричної. При підвищенні температури асиметричної прокатки до 100 °С різниця значно збільшується. Спостерігається різке покращення якості контакту. Про це свідчить зростання модуля пружності до 106 ГПа. Сира міцність стрічки досягає значень 389, 5 МПа. Ці значення є співставними з модулем пружності та границею міцності рекристалізованого титану. Після асиметричної прокатки при 200 та 300 °С сира міцність стрічок зберігається на рівні 400 МПа. Співставлення даних резонансної спектроскопії стрічок отриманих симетричною та асиметричною прокаткою при 200 °С вказує на значне зменшення площинних дефектів під дією зсувної деформації. Декремент коливач δ зменшується вдвічі а параметр $C_f \delta$ – в 5 разів.

Співставні значення модуля пружності та границі міцності з властивостями компактного матеріалу зазвичай трактується, як досягнення ідеального контакту. Але підвищення температури асиметричної прокатки до 400 °С сприяє подальшому значному підвищенню сирої міцності до 773 МПа. Такі великі значення міцності характерні для компактного титанового сплаву, продеформованого до великих ступенів деформації. Результати резонансної механічної спектроскопії вказують на подальше вдосконалення контактів та зменшення кількості площинних дефектів. Нарешті, після асиметричної прокатки при 600 °С спостерігається значне зниження сирої міцності до 138 МПа, що може бути пов'язано з впливом окиснення поверхонь порошків та початком рекристалізаційних процесів.

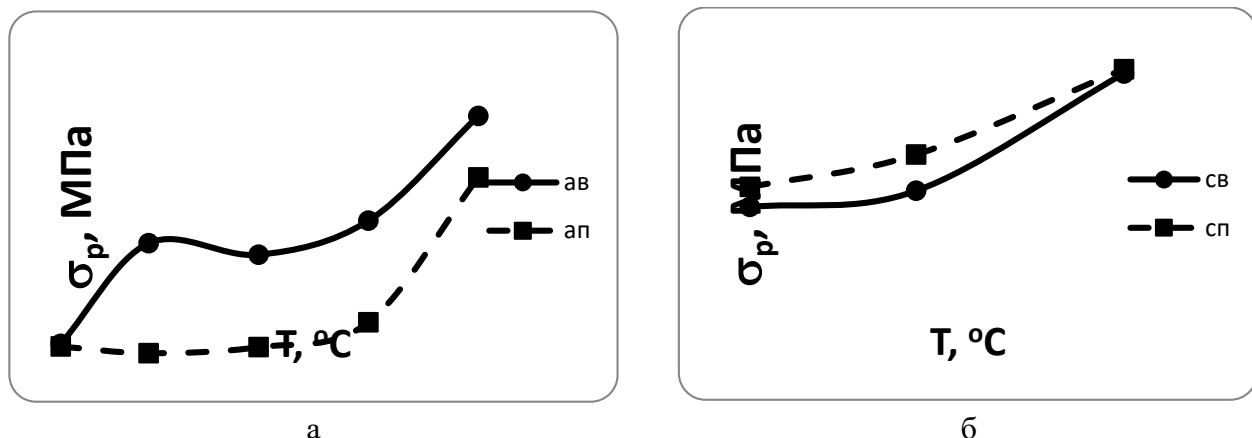


Рисунок 8 - Залежність границі міцності від температури асиметричної (а) та симетричної (б) прокатки. Випробування вздовж (—) і поперек (- -) напрямку прокатки.

Комплексна дія технологічних факторів на фізико-механічні властивості стрічок.

Аномальне підвищення сирої міцності після асиметричної прокатки при підвищених температурах слугувало передумовою пошуку найбільш сприятливих технологічних режимів отримання якісних контактів та максимальної сирої міцності. В подальших експериментах використовувалось захисне середовище для нагрівання порошку (аргон) та крім температури асиметричної прокатки варіювали прижимне зусилля.

На рис. 6 наведені діаграми навантаження на валках при асиметричній прокатці в координатах зусилля- час для титанових стрічок продеформованих при різних температурах з початковим притискним зусиллям 0 та 135 кН. Не зважаючи на те, що границя плинності титану в дослідженому діапазоні температур демонструє сильну температурну чутливість (при зростанні температури від 20 до 600 °С вона зменшується приблизно в 5 разів [14]), максимальне навантаження на валках проявляє слабку чутливість до температури прокатки. Максимальні значення деформуючого напруження в усіх випадках збільшуються з підвищенням притискної сили, але, як і при кімнатній температурі, переважний внесок в цей ефект вносить саме первинне притиснення.

Дослідження механічних властивостей прокату показали, що при підвищенні температури формування і зусиль прокатки зростають механічні властивості порошкового прокату і наближаються до властивостей компактного металу (табл. 4). Але пластичність ще знаходиться на незадовільному рівні і це потребує подальших досліджень. Структура зразків практично не має пор, а на деяких ділянках можна побачити ямковий злам, що говорить про утворення фізичного контакту (рис. 9).

Таблиця 4

Механічні властивості порошкового титанового прокату

Т прок. °С	Навант. N, кН	σ_{02} , МПа	ϵ_p , %	σ_p , МПа
1	2	3	4	5
20	0	78,8	0,03	85,8
	50			
	105	166	0,38	277
	135	180	0,24	265
200	0	92	0,3	140
	50	429	0,35	477
	105	503	0,24	508
	135	620	0,46	719
400	0	225	0,28	231
	50	655	1,07	861
	105	691	0,7	813
	135	541	0,3	566
600	0	123	0,41	136
	50	654	0,59	752
	105	592	0,33	608
	135	351	1,08	422

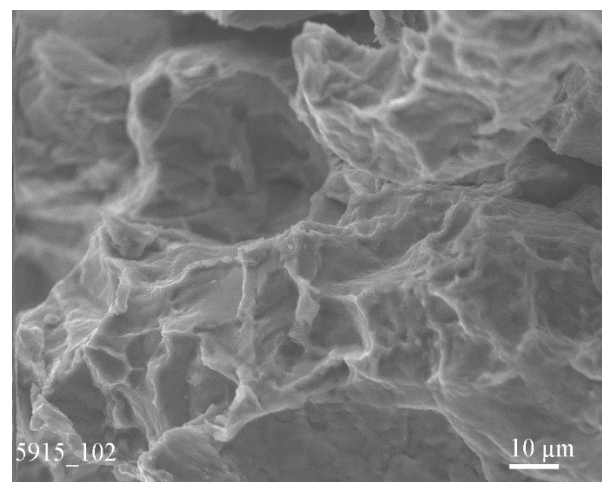
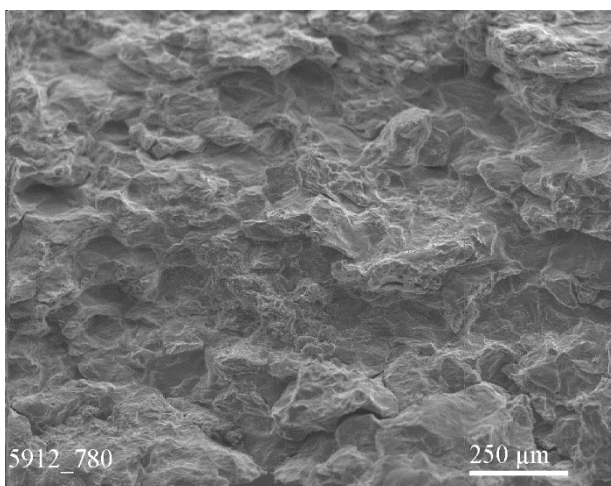


Рис. 9. Структура поверхні зламу порошкового прокату. Температура прокатки 400 °С

Оптимізація технологічних режимів прокатки порошків для отримання максимальної сирової міцності титанових стрічок.

Переходячи до обговорення та узагальнення отриманих результатів слід, перш за все, підкреслити, що контактоутворення є складним явищем, яке індуковане інтенсивною локалізованою пластичною деформацією в приповерхневому шарі порошків. Пластична деформація

ція відбувається в коротких проміжках часу і є чутливою до термодинамічних умов деформування. Слід також враховувати, що на міцність та пластичність стрічок впливає розподіл домішок в зоні контакту.

З наведених в табл. 4 результатів випливає, що використання методу асиметричної прокатки дозволяє значно підвищити механічні властивості титанових стрічок в порівнянні з симетричною прокаткою завдяки зсувній компоненті деформації, яка покращує умови контактоутворення на між часткових границях. При всіх досліджених температурах випробувань сира міцність та якість контактів між частинками в матеріалах, одержаних асиметричною прокаткою, на порядок перевищує такі в матеріалах після симетричної прокатки.

Достатньо складний характер впливу температури та притискового зусилля на міцність титанових стрічок, що отримані асиметричною прокаткою, можна пояснити з урахуванням зміни механізму деформації титану з температурою. При аналізі температурної чутливості границі плинності титану, зазвичай виділяють 3 області [14]. В області низьких температур (<100 °C) працюють пірамідальні та призматичні системи ковзання і деформація відбувається стрибко подібно за механізмом locking – unlocking (блокування-розблокування) [15]. Цей дислокаційний механізм потребує великих напружень для подолання перешкод пластичному деформуванню. Оскільки дислокаційні бар'єри мають термоактиваційну природу, при підвищенні температури до 100 -350 °C цей механізм деформації змінюється на дислокаційне ковзання по призматичним площинам. Напруження плинності в цьому температурному інтервалі залишається незмінним (так зване «плато»), але його значення приблизно в 2 рази нижче, ніж при кімнатній температурі. Нарешті, при температурах більше 350 °C (ця температурна межа залежить від швидкості деформації, кількості домішок, розмірів структурних елементів тощо) механізм деформації знову змінюється завдяки прискоренню дифузійних процесів, які активують різні механізми релаксації і сприяють значному деформаційному зменшенню. Зокрема, при температурі 600 °C границя плинності титану знижується ще приблизно в 3 рази в порівнянні зі стадією «плато».

Оскільки локалізований зсув безумовно має дислокаційну природу, розглянуті вище ефекти впливають на закономірності контактоутворення. При кімнатній температурі локалізований зсув значно покращує контактоутворення в порівнянні з симетричною прокаткою. Але через великі напруження плинності і короткий час деформації ($\sim 10^{-2}$ сек) утворення контакту відбувається не на всіх границях. Підвищення притискового зусилля збільшує деформацію в приконтатній зоні, що веде до покращення якості контакту і, як наслідок, до підвищення сирої міцності. При температурі 200 °C деформаційні процеси полегшуються і формування контакту прискорюється. Але і в цьому випадку додаткове притискання веде до посилення деформаційних процесів. Як наслідок, сира міцність досягає надзвичайно високого значення 719 МПа. Температура 400 °C формально відноситься до третього температурного діапазону, але, слід враховувати швидкоплинність деформації, оскільки релаксаційні дифузійні процеси є кінетично обумовленими. Тому при малих притискових напруженнях. (на початкових ділянках деформаційного зміцнення) переважають дислокаційні механізми контактоутворення, які притаманні 2 ділянці, і сира міцність досягає максимальних значень 861 МПа. Але в подальшому спостерігається її зниження через релаксацію деформаційної структури. Схоже явище спостерігається і при 600 °C, але максимальне значення сирої міцності досягається ще при меншому притисковому зусиллі.

Позитивний ефект захисної атмосфери в порошковій технології зазвичай не піддається сумніву та обговоренню, зважаючи на необхідність захисту поверхні порошків від забруднення. В дослідженому випадку це дозволило підвищити сирі міцність та пластичність, хоча сирі стрічки залишились відносно крихкими, максимальна деформація до руйнування не перевищувала 1,5 %. Але слід також звернути увагу на можливий „позитивний” вплив домішок. По-перше оксидні плівки іноді розглядають як змащувальне середовище при зварюванні тертям. По-друге, при великих швидкостях деформації за оптимальних температур деформування 200 – 400 °C в титані реалізуються механізми динамічного деформаційного старіння [16], які

значно підвищують деформуючу напругу. Можливо, саме через це зразок, який продеформований за цієї температури на повітрі, показав більшу міцність, ніж аналогічний зразок, продеформований в аргоні.

Оптимальними умовами асиметричної прокатки титанових стрічок слід вважати температури 200–400 °С та притискне зусилля ~100 кН. За цих умов стрічки демонструють найвищу сиру міцність ~ 800 МПа та динамічні характеристики, що характеризують високу якість контакту. Після прокатки при 200 °С стрічки мають найбільшу твердість $H_{\mu} = 200\text{--}215$ МПа. Цей показник, хоча значно вищий, ніж у рекристалізованого титану 120-140 МПа, але суттєво поступається значенням мікротвердості, що отримані на зразках титану продеформованих методами інтенсивної деформації $H_{\mu} = 320\text{--}350$ МПа. Саме через це, а також через незмінність геометричних розмірів стрічок після різних режимів деформування ми прийшли до висновку про локальний характер фізичних явищ, що відповідають за процес контактоутворення.

Зазначимо, що відтворюваність результатів та відносно логічна реакція досліджених характеристик на технологічні зміни не залишає сумнівів в існуванні і практичній значимості досліджених явищ. Але запропоновані в роботі фізико-механічні пояснення виявлених ефектів потребують більш глибокого вивчення.

ВИСНОВКИ

1. Використання методу асиметричної прокатки дозволяє значно покращити механічні властивості титанових стрічок в порівнянні з симетричною прокаткою завдяки зсувній компоненті деформації, яка покращує умови контактоутворення на між часткових границях

2. Отримані стрічки мають практично 100 % щільність ,

3. При використанні для прокатки температур > 300 °С. модуль пружності в подовженому і поперечному напрямку співставний з модулем компактного матеріалу, границя пропорційності суттєво вища ніж у компактного матеріалу завдяки утворенню в стрічці деформаційної субструктури. Пластичність низька.

4. Якість контактів між частинками в матеріалах, одержаних асиметричною прокаткою, на порядок перевищує такі в матеріалах після симетричної прокатки.

5. Отримані результати показують напрямки вдосконалення технології прокатки, які дозволяють без спікання одержати з титанового порошку матеріали, динамічні механічні характеристики яких (пружність та здатність до демпфування) наближається до таких компактного титану

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Подрезов Ю.М., Евич Я.И., Вербило Д.Г. Роль сдвиговых деформаций в консолидации порошковых материалов. *Физика и техника высоких давлений*. 2014. Т. 24, № 1. С. 98–109.
2. Подрезов. Ю.М., Назаренко В.А., Евич Я.И. Марченко Н.М. Вивчення закономірності контактоутворення в металевих порошковых матеріалах за результатами прецизійних механічних випробувань. *Электронная микроскопия и прочность материалов*. К.: Тр. ИПМ НАНУ. Вып. 16, 2014. С. 157–163.
3. Gogaev K.A., Voropaev V.S., Podrezov Yu.N., Lugovskoi Yu.F, Nazarenko V.A., Koval A.Yu., and Yevych Ya.I., “Mechanical and fatigue properties of powder titanium strips, obtained by asymmetric rolling”, *Powder Metall. Met. Ceram.*, 56, 53-59 (2017).
- 4 Kalutskii G.Ya., Gogaev K.A., Voropaev V.S. and Nepomnyashchii V.V., “Asymmetric rolling of metal powders and granules”, *Powder Metall. Met. Ceram.*, 46, 197–201 (2007).
5. Gogaev K.A., Kalutskii G.Y. and Voropaev V.S., Asymmetric rolling of metal powders. II. Angular parameters of asymmetric rolling. *Powder Metall. Met. Ceram.* 48, 274–278 (2009).
6. Воропаев В.С. Влияние величины рассогласования при асимметричной прокатке порошков на эпюру суммарного нормального контактного напряжения. *Технологические системы*. 2012. № 4(61). С. 28–30.
7. Gogaev K. A., Voropaev V. S., Podrezov Yu. N., Evich Ya.I. and Koval' A.Yu., “The effect of compacting rolling on the properties of titanium powder mill products”, *Powder Metall. Met. Ceram.*, 55, No. 11, 633–639 (2017).
8. Штерн М.Б., Бейгельзимер Я.Е., Михайлов О.В., Сынков А.С. Винтовая экструзия порошковых заготовок. II. Эксперимент и обсуждение результатов. *Физика и техника высоких давлений*. 2008. Т. 18, № 3. С. 92–98.
9. Штерн М.Б., Бейгельзимер Я.Е., Епифанцева Т.А., Сынков А.С. Получение неспеченных гетерогенных композиционных материалов методом винтовой экструзии. *Физика и техника высоких давлений*. 2009. Т. 19, № 3. С. 120–124.

10. Beygelzimer Y.E., Pavlenko D.V., Synkov O.S. and Davydenko O.O., “The efficiency of twist extrusion for compaction of powder materials”, *Powder Metall. Met. Ceram.*, 58, 7–12 (2019).
11. Timoshenko S., Young D.H., Weaver W., Jr., *Vibration Problems in Engineering*, Wiley, 1974, 472 p.
12. Gogaev K.A., Voropaev V.S., Vdovychenko O.V., Podrezov Yu.N., Gadzyra N.F., Yevich Ya.I. “The influence of deformation modes on the structure and properties of Al-Mg-X powder composites I. The influence of rolling conditions on the mechanical properties of aluminum powder ribbons strengthened with SiC nanoparticles” *Powder Metall. Metal Ceramics*, 57, 257-264 (2018).
13. Katashinskii V.P. and Shtern M.B. “Stressed-strained state of powder being rolled in the densification zone. I. Mathematical model of rolling in the densification zone”, *Powder Metall. Met. Ceram.*, 22, 11, 882-885 (1983).
14. Котко А.В., Моисеев В.Ф., Моисеева И.В. Формирование дислокационных структур и механические свойства α -титана в интервале от –196 до 850 °С. *Металлофизика и новейшие технологии*. 1997. Т. 19, № 4. С. 50.
15. Clouet E., Caillard D., Chaari N., Onimus F. and Rodney D. Dislocation locking versus easy glide in titanium and zirconium. *Nature materials*. September 2015. Vol 14. pp. 931-937. www.nature.com/naturematerials. DOI: 10.1038/NMAT4340
16. Cheng J. and Nemat-Nasser S. A Model for experimentally observed high strain rate dynamic strain aging in titanium. *Acta mater.* 48 (2000) 3131-3144.

REFERENCES

1. Podrezov Yu. N., Evich Ya.I. Verbylo D. G. The role of shear deformations in the consolidation of powder materials. *Physics and technology of high pressures*. 2014. V. 24, № 1. С. 98–109. (in Russian).
- 2 Podrezov Yu. N., Nazarenko V.A., Yevych Ya.I. Marchenko N.M. Study of the regularity of contact formation in metal powder materials based on the results of precision mechanical tests. . Electron microscopy and strength of materials K.: IPMS № 16, 2014. С. 157–163. (in Ukrainian).
3. Gogaev K.A., Voropaev V.S., Podrezov Yu.N., Lugovskoi Yu.F, Nazarenko V.A., Koval A.Yu., and Yevych Ya.I., “Mechanical and fatigue properties of powder titanium strips, obtained by asymmetric rolling”, *Powder Metall. Met. Ceram.*, 56, 53-59 (2017).
4. Kalutskii G.Ya., Gogaev K.A., Voropaev V.S. and Nepomnyashchii V.V., “Asymmetric rolling of metal powders and granules”, *Powder Metall. Met. Ceram.*, 46, 197–201 (2007).
5. Gogaev K.A., Kalutskii G.Y. and Voropaev V.S., Asymmetric rolling of metal powders. II. Angular parameters of asymmetric rolling. *Powder Metall. Met. Ceram.* 48, 274–278 (2009).
6. Voropaev V.S. Effect of Mismatch in Asymmetric Rolling of Powders on the Plot of Total Normal Contact Stress. *Technological systems*. 2012. № 4(61). С. 28–30. (in Russian).
7. Gogaev K. A., Voropaev V. S., Podrezov Yu. N., Evich Ya.I. and Koval’ A.Yu., “The effect of compacting rolling on the properties of titanium powder mill products”, *Powder Metall. Met. Ceram.*, 55, No. 11, 633–639 (2017).
8. Stern M. B., Beigelzimer Ya. E., Mikhailov O. V., and Synkov A. S. Twist extrusion of powder blanks. II. Experiment and discussion of results. *Physics and technology of high pressures*. 2008. V. 18, No. 3. S. 92–98. (in Russian)
9. Stern M. B., Beigelzimer Ya. E., Epifantseva T.A. Synkov A. S. Obtaining unsintered heterogeneous composite materials by screw extrusion. *Physics and technology of high pressures*. 2009. V. 19, No. 3. S. 120 –124. (in Russian)
10. Beygelzimer Y.E., Pavlenko D.V., Synkov O.S. and Davydenko O.O., “The efficiency of twist extrusion for compaction of powder materials”, *Powder Metall. Met. Ceram.*, 58, 7–12 (2019).
11. Timoshenko S., Young D.H., Weaver W., Jr., *Vibration Problems in Engineering*, Wiley, 1974, 472p.
12. Gogaev K.A., Voropaev V.S., Vdovychenko O.V., Podrezov Yu.N., Gadzyra N.F., Yevich Ya.I. “The influence of deformation modes on the structure and properties of Al-Mg-X powder composites I. The influence of rolling conditions on the mechanical properties of aluminum powder ribbons strengthened with SiC nanoparticles” *Powder Metall. Metal Ceramics*, 57, 257-264 (2018).
13. Katashinskii V.P. and Shtern M.B. “Stressed-strained state of powder being rolled in the densification zone. I. Mathematical model of rolling in the densification zone”, *Powder Metall. Met. Ceram.*, 22, 11, 882-885 (1983).
14. Kotko A.V., Moiseev V.F., Moiseeva I.V. Formation of dislocation structures and mechanical properties of α -titanium in the range from –196 to 850 °С. *Metallophysics and the latest technologies*. 1997. V. 19, No. 4. S. 50. (in Russian)
15. Clouet E., Caillard D., Chaari N., Onimus F. and Rodney D. Dislocation locking versus easy glide in titanium and zirconium. *Nature materials*. September 2015.Vol 14. pp.931-937 www.nature.com/naturematerials DOI: 10.1038/NMAT4340
16. Cheng J. and Nemat-Nasser S. A Model for experimentally observed high strain rate dynamic strain aging in titanium. *Acta mater.* 48 (2000) 3131-3144.

Gogaev K., Voropaev V., Podrezov Yu., Minakov M., Vdovychenko O. The influence of technological parameters asymmetric rolling on the physics and mechanical properties of titanium powder sheets.

To work out optimal technological modes of asymmetric rolling for obtaining titanium powder sheets. with maximum raw strength, a complex approach was used, which involves the study of the influence of several technological factors: deformation scheme (symmetric and asymmetric rolling), rolling temperature, force on the rolls and protective

medium. The studies have shown that asymmetrical rolling method allows to significantly improve the mechanical properties of titanium powder sheets compared to symmetric rolling due to the shear component of the deformation, which improves the conditions of contact formation at the inter-particle boundaries. The optimal conditions asymmetric rolling for obtaining strengthening titanium sheets are: a temperature interval of the rolling process $T_r = 200-400$ °C and a pressing force $N \sim 100$ kN. Under these conditions, the powder sheets demonstrate the highest green strength in the range $\sigma_f = 800$ MPa and dynamic characteristics approaching the values characteristic of compact titanium. After asymmetric rolling at 200 °C, the sheets have the highest hardness $H\mu = 200-215$ MPa. This value is significantly higher than that of recrystallized titanium, but is significantly inferior to the values of microhardness obtained on titanium samples deformed by severe plastic deformation methods. Relatively low hardness, as well as the invariance of the geometric dimensions of the sheets after different modes of deformation, indicates the local nature of intense shear at the interparticle boundaries, which enhances the process of contact formation. The use of a protective atmosphere allows to increase strength and plasticity but the sheets remained relatively brittle, their maximum deformation before failure did not exceed $\varepsilon = 1.5$ %.

Key words: asymmetric rolling, temperature, pressive force, green strength, plasticity, interparticle contact, local shear.

Гогаєв Казбек Олександрович – д-р техн. наук, проф, зав. від. ІПМ НАН України, член-кор. НАН України

Gogaev Kazbek – Doctor of Technical Sciences, Full Professor. Head of Department IPMS

E-mail: gogaevukraine@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0042-1759>

Воропаєв Віталій Семенович – канд. техн. наук, пров. наук. співр. ІПМ НАН України

Voropaiev Vitalii – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, IPMS

E-mail: vvpuma@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7408-5957>

Подрезов Юрій Миколайович – д-р фіз.-мат. наук, зав. від. ІПМ НАН України

Podrezov Yuriy – Doctor of Phis.-Mat Sciences, Head of Department IPMS

E-mail: vvpuma@ukr.net

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9226-7041>

Мінаков Микола Веніамінович – канд. техн. наук, ст. наук. співроб. ІПМ НАН України

Minakov Mykola – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, IPMS

E-mail: vbyfrjd86@gmail.com

Вдовиченко Олександр Васильович – д-р техн. наук, зав. лаб. ІПМ НАН України

Vdovychenko Oleksandr – Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory IPMS

E-mail: vdovyche@gmail.com

Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича Національної академії наук України (ІПМ ім. І. М. Францевича НАНУ), м. Київ

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Стаття надійшла до редакції 10.08.23 р.