

PASC: 62.20.–x

К.А. Гогаев, В.С. Воропаев, Ю.Н. Подрезов, Я.И. Евич, В.И. Даниленко

## ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ТИТАНОВЫХ ЛЕНТ ПУТЕМ КОНСОЛИДАЦИИ ПОРОШКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2016 года

*Приведены результаты механических испытаний титановых лент, изготовленных путем прокатки порошка. Полученные данные свидетельствуют о преимуществах асимметричной прокатки по сравнению с симметричной. Установлено, что после асимметричной прокатки сырая прочность полос в 5 раз выше. После спекания механические свойства порошковых полос сопоставимы с аналогами, полученными прокаткой компактного материала. Дополнительный подкат с использованием асимметричной прокатки позволил изготовить деформированные ленты, которые по прочности и пластичности превосходят аналогичные изделия, полученные по традиционной технологии. Проанализирована роль сдвиговых деформаций в формировании контактов для изделий порошкового генезиса. Рассмотрены преимущества и недостатки асимметричной прокатки, а также место этой схемы деформирования в общей методологии интенсивной пластической деформации (ИПД).*

**Ключевые слова:** титановые полосы, порошок, асимметричная прокатка, прочность, пластичность

*Наведено результати механічних випробувань титанових стрічок, виготовлених шляхом прокатки порошку. Отримані дані свідчать про переваги асиметричної прокатки у порівнянні з симетричною. Встановлено, що після асиметричної прокатки сира міцність смуг у 5 разів вище. Після спікання механічні властивості порошкових смуг співставні з аналогами, отриманими прокаткою компактного матеріалу. Додатковий підкат з використанням асиметричної прокатки дозволив виготовити деформовані стрічки, які за міцністю та пластичністю переважають аналогічні вироби, що отримані за традиційною технологією. Проаналізовано роль зсувних деформацій у формуванні контактів для виробів порошкового генезису. Розглянуто переваги та недоліки асиметричної прокатки, а також місце цієї схеми деформування в загальній методології інтенсивної пластичної деформації (ІПД).*

**Ключові слова:** титанові стрічки, порошок, асиметрична прокатка, міцність, пластичність

Поскольку наиболее распространенные схемы ИПД: равноканальное угловое прессование (РКУП) [1,2] и винтовая экструзия [3] – имеют

существенные ограничения в промышленном применении из-за сравнительно малого размера получаемых изделий, в последние годы значительно возрос интерес к разработке промышленных комбинированных схем ИПД. Среди них особое место занимает схема асимметричной прокатки, которая позволяет создать в образце сложное напряженное состояние, где интенсивный сдвиг совмещен с редуцией образца, характерной для традиционной прокатки. При такой схеме деформирования суперпозиция трансляционной и ротационной мод возникает непосредственно в процессе прокатки. Происходит включение дополнительного канала размножения дислокаций, что позволяет значительно повысить концентрацию дефектов, которые принимают участие в структурообразовании.

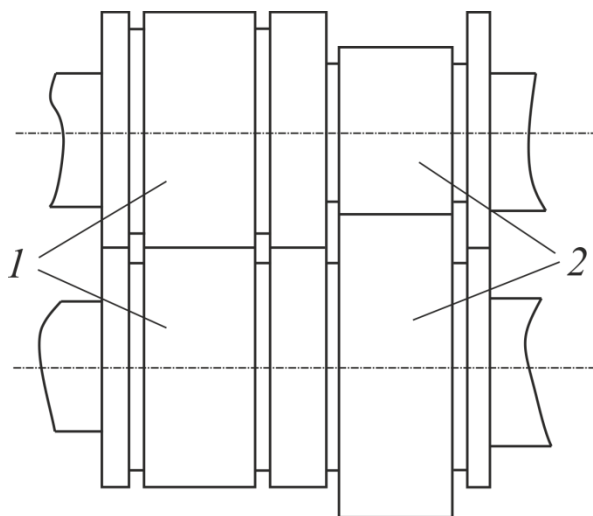
Первые работы в этом направлении [4,5] продемонстрировали несомненную перспективность комбинированных схем ИПД. Однако существенного выигрыша в механических свойствах по сравнению с традиционными схемами обнаружено не было, что свидетельствовало о необходимости тщательного подбора параметров деформирования. Лишь в последние годы появились работы, которые продемонстрировали значительное преимущество технологии асимметричной прокатки. Жу с сотр. [6] на титановых образцах, продеформированных по этой схеме, получили рекордно высокую прочность, которая сочетается с большой равномерной деформацией. Аномально высокие свойства сырых (непеченных) лент из прокатанного порошкового титана были продемонстрированы в работах [7,8].

Цель работы – познакомить читателей с нашими последними данными по механическому поведению титановых лент, полученных асимметричной прокаткой из порошковых и компактных титановых образцов, и продемонстрировать преимущества этой схемы деформирования.

Суть технологии асимметричной прокатки заключается в деформировании полосы с использованием валков одинакового диаметра, которые вращаются с различными скоростями  $V_2 > V_1$ , или деформирование валков разного диаметра, когда при одинаковой радиальной скорости разница в окружных скоростях реализуется за счет разного диаметра валков. Это приводит к появлению в очаге деформации противоположно направленных сил контактного трения, которые вызывают в пластической области дополнительные сдвиговые деформации, благодаря чему значительно снижается усилие прокатки, более равномерно распределяется давление по длине очага деформации, улучшается качество проката.

Методом асимметричной прокатки с использованием валков разного диаметра были продеформированы титановые образцы двух видов: одни были сформованы из титанового порошка ПТЭС с последующей комбинацией спекания и уплотняющих прокаток, другие представляли собой прямоугольные деформированные титановые заготовки, полученные методом РКУП. На различных технологических этапах полуфабрикаты испытывали на одноосное растяжение или четырехточечный изгиб и проводили сравни-

тельный анализ механического поведения образцов, полученных по разным схемам. После завершения всех операций процесса деформирования сравнивали механические свойства титановых полос с существующими аналогами, полученными по другим технологиям.



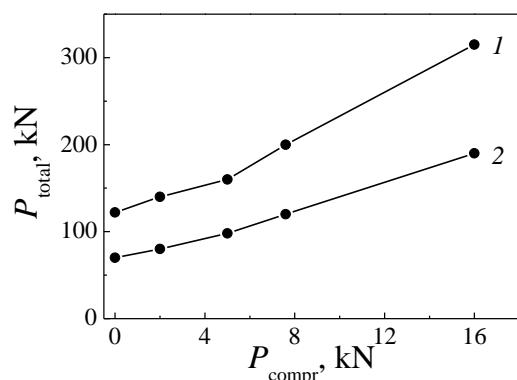
**Рис. 1.** Схема калибровки валков стана ДУО: 1, 2 – калибры соответственно для симметричной и асимметричной прокатки

Изучение режимов формования порошковых заготовок и последующих уплотняющих прокаток спеченных порошковых полос проводили на стане ДУО, используя валки с калибровкой (рис. 1). Это позволяло формировать и уплотнять порошковую полосу в условиях как симметричной, так и асимметричной прокатки без изменения геометрических параметров очагов деформации. Данный стан применяли и при деформировании титановых заготовок, полученных методом РКУП. Коэффициент рассогласования при асимметричной прокатке составлял 1.25.

В работах М.Б. Штерна с сотр. [9–11] для компактирования порошка использована технология винтовой экструзии, разработанная в ДонФТИ НАНУ Я.Е. Бейгельзимером с сотр. [3]. В наших работах [5,7] показано, что асимметричная прокатка по сравнению с симметричной позволяет получать более плотные заготовки, обладающие повышенной прочностью в неспеченном состоянии. Следующий шаг совершенствования этой схемы был направлен на увеличение нормальных контактных напряжений, что достигалось предварительным сжатием валкового узла нажимными винтами. Отсчет предварительного сжатия вели от нулевого зазора между валками с шагом 0.5 оборота нажимного винта. Фиксацию общего усилия прокатки осуществляли с помощью месдоз, установленных под нажимными винтами. Проведен сравнительный анализ влияния этого фактора на силовые параметры прокатки и свойства полос, полученных симметричной и асимметричной прокаткой.

Эксперименты по фиксации общего усилия при предварительном сжатии валкового узла и усилий прокатки показали, что уменьшение зазора между валками за счет предварительного сжатия валкового узла нажимным винтом приводит к росту усилия прокатки (рис. 2). Величина общего усилия при асимметричной прокатке меньше, чем при симметричной прокатке для идентичных условий. При этом разница усилий слабо изменяется с увеличе-

нием усилия сжатия винтов. Это можно объяснить сохранением геометрических параметров очага деформации и соответственно сохранением величины промежуточной зоны, в которой действуют тангенциальные напряжения, определяющие сдвиговые деформации, отвечающие за реализацию ротационного механизма деформации.



**Рис. 2.** Зависимость общего усилия при прокатке от усилия предварительного сжатия валков: 1, 2 – общее усилие соответственно при симметричной и асимметричной прокатке

**Рис. 3.** Разрушение листа титана вследствие перепрессовки при симметричной прокатке

Одной из особенностей прокатки порошковых объектов является изменение объема деформируемого листа. При прокатке сыпучих тел угол прокатки устанавливается самопроизвольно. Он зависит от свойств порошка и условий прокатки, при этом его величина в несколько раз (особенно при прокатке гранул) превышает угол тонколистовой прокатки компактного материала. При симметричной прокатке изменение угловых параметров на обоих валках соответствует их зеркальному отражению. Плоскость раздела зон отставания и опережения при вертикальной прокатке параллельна плоскости по линии центров валков.

При исследовании силовых параметров процесса асимметричной прокатки порошков [7] были установлены различия как в конфигурации очага деформации при замерах нормальных контактных напряжений на каждом из валков, так и в величине самих нормальных контактных напряжений на валках большего  $D_b$  и меньшего  $D_s$  диаметров. При всех соотношениях диаметров валков, начиная с  $D_b/D_s = 1.12$  и выше, максимальное контактное нормальное напряжение на ведомом (меньшем) валке всегда больше, чем на ведущем (большем). Проведенный в работе [12] анализ эпюр нормального контактного напряжения для асимметричной прокатки с рассогласованием 1.32 и 1.42 показал, что с ростом величины рассогласования происходит увеличение дуги контакта (соответственно 17 и 22 deg) и протяженности промежуточной зоны (2.8 и 8 deg), в которой тангенциальные составляющие

направлены навстречу. Рост промежуточной зоны ведет к увеличению провалов на суммарной эпюре нормального контактного напряжения и, как следствие, к уменьшению общего давления прокатки.

Согласно данным, приведенным в работе [13], параметры очага деформации при асимметричной прокатке определяются геометрией валков и степенью их рассогласования. Величина промежуточной зоны, в которой действуют тангенциальные напряжения, формирующие сдвиговые деформации, ответственные за реализацию их ротационного механизма, зависит только от геометрических параметров очага деформации.

При выбранной геометрии прокатки повлиять на уплотнение полосы можно за счет изменения трансляционного механизма деформации, который определяется нормальными контактными напряжениями. Сравнительный анализ процесса уплотнения полос при симметричной и асимметричной прокатке [7] показывает, что при традиционной (симметричной) прокатке требуется большее максимальное контактное нормальное напряжение для получения лент такой же плотности. При асимметричной прокатке эффект снижения контактного давления проявляется как на большом, так и на малом валках. Это приводит к уменьшению общего усилия прокатки по асимметричной схеме. Данные, приведенные на рис. 2, подтверждают наши предыдущие результаты и свидетельствуют о выигрыше в силовых параметрах процесса деформирования при использовании метода асимметричной прокатки.

Недостатком использования процесса симметричной прокатки по сравнению с асимметричной является ограничение по максимальной плотности формируемой полосы. Уменьшение зазора между валками позволяет увеличить плотность проката при симметричной прокатке, однако может привести к «перепрессовке» [14] и вызвать образование трещин, а в некоторых случаях – полную деструкцию полосы (рис. 3). Подобное явление можно объяснить возникновением растягивающих напряжений при уширении, которые превышают прочность сырой порошковой полосы. Асимметричная прокатка требует меньших усилий, не вызывающих разрушения лент при прочих равных условиях формования, что позволяет избежать явления «перепрессовки» проката.

Сравнение плотности неспеченных прокатанных полос показало, что после асимметричной прокатки плотность полос превышает плотность полос, полученных традиционным способом. Максимальная плотность при асимметричной прокатке достигается при меньших усилиях.

Фрактографические исследования поверхностей разрушения сырых порошковых полос, сформованных симметричной и асимметричной прокаткой, свидетельствуют, что разрушение в обоих случаях происходит по межчастичному механизму (рис. 4). В образцах, полученных симметричной прокаткой, форма частиц порошка практически не изменяется, и наблюдается остаточная пористость (рис. 4,а). Применение асимметричной прокатки

приводит к значительной деформации частиц порошка в направлении прокатки под действием тангенциальных напряжений, а также к уменьшению пористости проката (рис. 4,б).

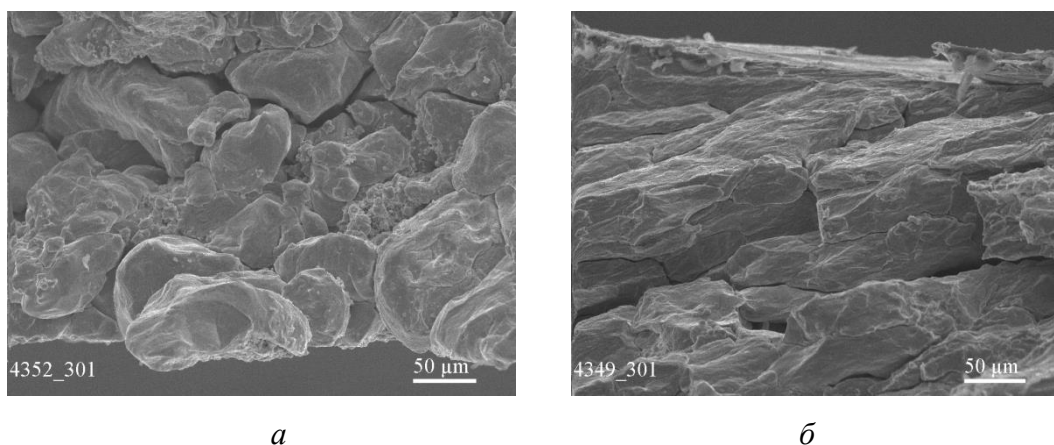


Рис. 4. Структура поверхности разрушения проката, сформированного симметричной (а) и асимметричной (б) прокаткой

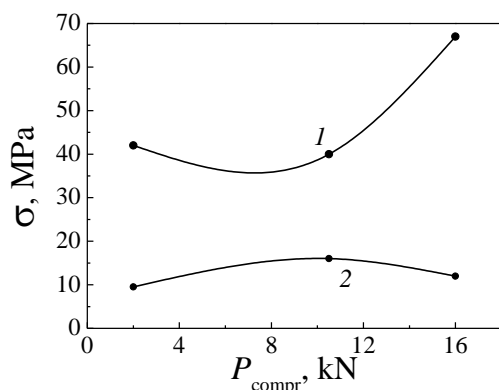


Рис. 5. Результаты испытаний на изгиб сырых полос, сформированных асимметричной (1) и симметричной (2) прокаткой

Как показали исследования влияния величины предварительного сжатия валков на механические свойства сырого проката (рис. 5), при всех режимах деформирования свойства материала, сформированного асимметричной прокаткой, значительно выше.

Прочность неспеченных полос, полученных асимметричной прокаткой, выше, чем у изготовленных по традиционной технологии, в 3–5 раз, а при максимальных сжимающих усилиях на валках – более чем в 10 раз. Эти самые прочные, сырые полосы спекали при температуре 1000°C, после чего подвергали уплотняющей симметричной прокатке с обжатиями 20, 40 и 60% для устранения остаточной пористости. Полученные полосы снова отжигали при температуре спекания 1000°C в течение 1 h. Вырезанные из них образцы испытывали на одноосное растяжение. В табл. 1 представлены основные механические характеристики полос:  $\sigma_{001}$ ,  $\sigma_{02}$  – пределы соответственно упругости и текучести,  $\sigma_{\text{alt}}$  – максимальное напряжение,  $\delta_{\text{unif}}$  – равномерная деформация,  $\psi$  – относительное сужение.

Данные таблицы свидетельствуют, что повторная уплотняющая прокатка позволяет улучшить механические свойства материала, при этом возрастают и прочность, и пластичность полос. Следует отметить, что механические

свойства растут с увеличением степени деформации и достигают максимума при обжатии в пределах 20–40%. Дальнейшее повышение обжатия до 60% не приводит к улучшению механических характеристик. По комплексу механических свойств в оптимальных структурных состояниях исследуемые образцы не уступают компактному титану, полученному по традиционным технологиям, для которого  $\sigma_{02} \sim 300$  МПа, а  $\delta \sim 26\%$ .

Таблица 1

Механические свойства титанового проката после уплотняющей прокатки

Дополнительная деформация, %	$\sigma_{001}$	$\sigma_{02}$	$\sigma_{alt}$	$\delta_{unif}$	$\psi$
	МПа			%	
0	233	273.5	349	30	55
20	259	281.4	359.5	36.9	74.2
40	269	303	379.5	28	76
60	268.5	290.8	373.4	28.8	66.1

Далее нами были проанализированы возможности использования асимметричной прокатки для изготовления деформированных порошковых титановых полос. Для этого такие же, как в предыдущем эксперименте, сырые порошковые титановые полосы, полученные асимметричной прокаткой, спекали при температуре 1000°C. Затем образцы повторно подвергали симметричной и асимметричной прокатке. Степень деформации для обеих схем составила 73%. Полученные тонкие (0.35  $\mu\text{m}$ ) деформированные титановые полосы испытывали на одноосное растяжение в продольном и поперечном направлениях.

Таблица 2

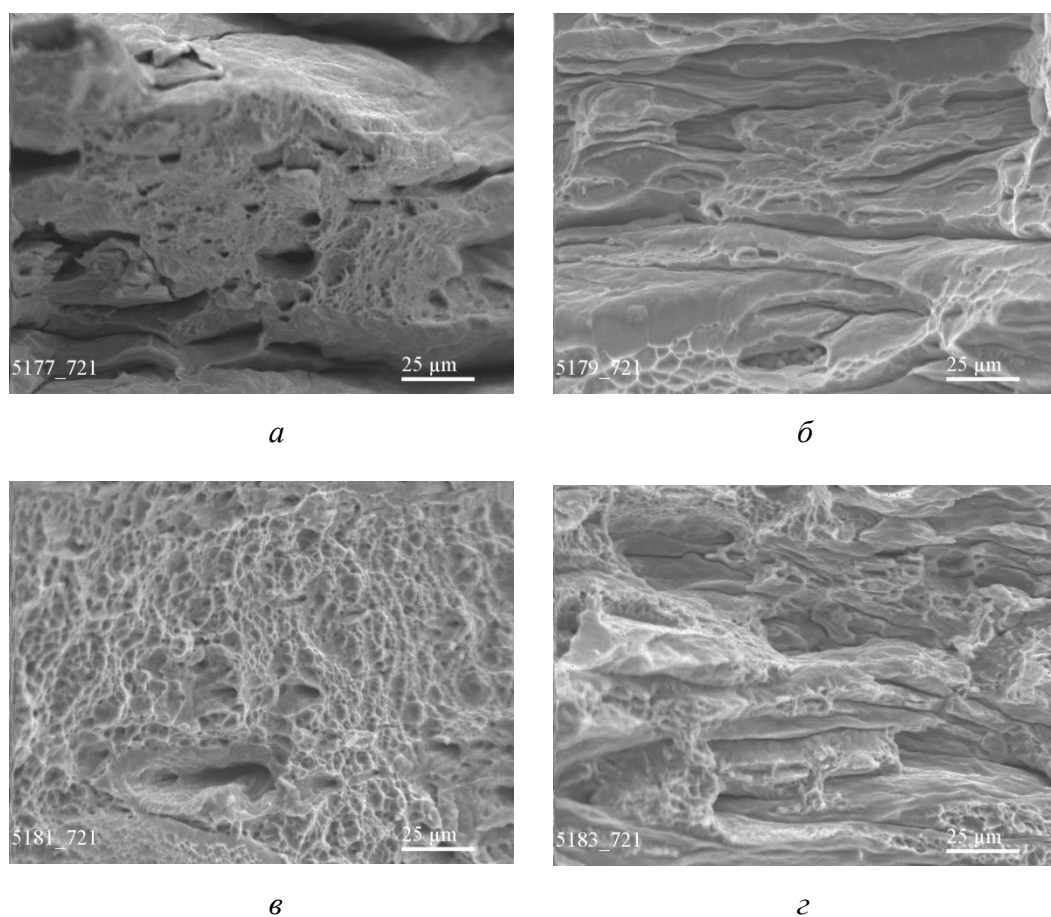
Механические свойства деформированной ( $\epsilon = 73\%$ ) титановой полосы

Схема прокатки, направление	$\sigma_{alt}$	$\sigma_{02}$	$\sigma_{001}$	$\delta_{unif}$	$\delta_{total}$
	МПа			%	
Симметричная, продольное поперечное	720	670	630	1.45	2.15
	669	618	600	0.23	0.23
Асимметричная, продольное поперечное	780	745	719	4.9	7.76
	700	682	655	2.4	2.4

Результаты механических испытаний представлены в табл. 2. Из таблицы видно, что прочность полос, продеформированных асимметричной прокаткой, выше, чем у продеформированных симметричной прокаткой. Это свидетельствует о целесообразности применения схемы асимметричной про-

катки для получения порошковых титановых полос. Если такую схему использовать только на стадии формования порошковой полосы, а в дальнейшем деформирование осуществлять с помощью симметричной прокатки, то свойства полученных изделий лишь приближаются к свойствам литых компактных полос. Для достижения сопоставимых свойств в этом случае требуется меньше дополнительных прокаток, чем при традиционной порошковой технологии [15]. Если же асимметричная прокатка используется на стадиях как формования порошковой полосы, так и упрочняющих прокаток, то ее механические свойства превышают характеристики не только аналога, изготовленного по традиционной порошковой технологии, но и компактных титановых полос, полученных из литого материала.

Преимущества использования асимметричной прокатки при деформировании порошковых полос демонстрируют результаты фрактографического анализа.



**Рис. 6.** Поверхность разрушения порошковых титановых полос, испытанных на одноосное растяжение при использовании прокатки: *a*, *б* – симметричной соответственно в продольном и поперечном направлениях; *в*, *г* – асимметричной соответственно в продольном и поперечном направлениях



На поверхности излома образцов, докатанных по симметричной схеме (рис. 6,а,б), хотя и обнаружено преимущественно ямочное разрушение, но явно прослеживаются следы пор и участки межчастичного разрушения, свидетельствующие о порошковом генезисе структуры прокатанных лент. При использовании асимметричной прокатки разрушение образца, испытанного в продольном направлении (рис. 6,в), практически полностью ямочное внутрикристаллитное. Обнаруженное различие в формировании излома объясняется тем, что после спекания при 1000°C физический контакт между порошинками в полуфабрикатах сформирован не полностью и последующая низкотемпературная деформация симметричной прокаткой не приводит к его дальнейшему усовершенствованию.

При асимметричной прокатке происходит дальнейшее совершенствование контакта. Причиной, как и на стадии консолидации, является наличие сдвиговой компоненты деформации, характерной для данной схемы прокатки. Интересно, что образец, изготовленный по этой схеме в поперечном направлении прокатки, проявляет некоторую склонность к межчастичному разрушению (рис. 6,г). Это, по-видимому, связано с тем, что сдвиговая деформация развивается вдоль направления прокатки и локализованный сдвиг происходит в первую очередь в межчастичных границах, расположенных в этом же направлении. Важно, что при асимметричной прокатке не только прочностные, но и пластические характеристики оказываются выше, чем у компактного титана.

В наших работах [16,17], посвященных влиянию степени деформации на равномерную деформацию  $\delta_{unif}$  титана, полученного по литейной технологии, было показано, что в сильнодеформированных титановых листах величина  $\delta_{unif}$  не превышает 1.5% из-за сильной структурной и кристаллографической анизотропии. В материалах, полученных методами ИПД, такое влияние значительно меньше, и, как показал Р.З. Валиев [18], в этом случае сильнодеформированный титан может демонстрировать достаточно большую величину  $\delta_{unif}$ . Ж. Жу с сотр. [6] показал, что компактный титан, продеформированный асимметричной прокаткой до большой степени деформации, демонстрирует не только высокое упрочнение, но и сравнительно большую равномерную деформацию ( $\delta_{unif} = 6\%$ ). Из данных, представленных в табл. 2, видно, что после асимметричной прокатки порошкового титана равномерная деформация существенно выше, чем после симметричной. Для образцов, испытанных в продольном направлении, ее величина близка к значениям, полученным Ж. Жу на компактном титане.

Характеристика равномерной деформации является критериальным параметром для оценки деформационной способности листов (deformability) на стадии предания листовым изделиям сложной формы (путем штамповки, глубокой вытяжки и т.п.). Поэтому возможность управления этой характеристикой за счет совершенствования схемы прокатки имеет важное практическое значение.

Эти соображения, а также результаты упомянутой работы Ж. Жу с сотр. [6] и наши экспериментальные данные, полученные на порошковых лентах, предопределили направленность последующего эксперимента с использованием асимметричной прокатки. Нами было проведено сравнение механических свойств на образцах титана литейного генезиса, отвечающих составу сплава ВТ1-0, прокатанных по асимметричной и симметричной схемам. Чтобы не повторять результаты работы [6], мы изменили исходные условия и вместо рекристаллизованного титана прокатывали прямоугольные образцы  $14 \times 14 \times 150$  mm, подвергнутые РКУП при комнатной температуре за 6 проходов по схеме В<sub>С</sub> [18].

Именно такие образцы были исследованы нами ранее [19] при анализе влияния степени деформации симметричной прокаткой на механические свойства титановых полос, предварительно подвергнутых РКУП. В этой работе механические испытания проводили на растяжение и сжатие в трех различных направлениях. Результаты настоящей работы позволяют дополнить полученные ранее данные благодаря применению дополнительной асимметричной схемы прокатки и увеличению степени деформации. В экспериментах, описанных в [19], образец высотой 14 mm разрезали вдоль длинной оси на заготовки 8 и 6 mm и деформировали методом симметричной прокатки до толщины 4 mm, относительная деформация  $\varepsilon$  составляла соответственно 33 и 50%, а истинная деформация  $e = 0.40$  и  $0.7$ . В предлагаемом эксперименте 2 образца высотой 14 mm прокатывали до толщины 4 mm: один – по симметричной, а другой – по асимметричной схеме. Относительная деформация  $\varepsilon = 71.5\%$ , истинная деформация  $e = 1.25$ . Результаты испытаний на сжатие представлены в табл. 3.

Как видно из таблицы, испытания на одноосное сжатие подтверждают выводы предыдущей работы о том, что механическое поведение образцов, продеформированных по комбинированной схеме, такое же, как у рекристаллизованных образцов, продеформированных прокаткой до разных степеней деформации [19]. При увеличении степени деформации предел текучести постоянно повышается, причем наибольший рост демонстрируют образцы, сжатые в направлении  $Z$ . Коэффициенты линейного упрочнения  $\theta_{VI}$  в направлениях  $X$  и  $Z$  постоянно снижаются с ростом деформации, что связано с увеличением анизотропии. В направлении  $Y$  этот параметр изменяется слабее ввиду незначительного варьирования поперечных размеров листа.

Новые данные по симметричной и асимметричной прокатке находятся в полном соответствии с предыдущими результатами и лишь дополняют общую картину. Как было показано нами в работе [17], в деформированных материалах низок показатель линейного упрочнения при сжатии – предвестник их быстрой локализации при растяжении. В отличие от РКУП-образца, для которого значения показателя упрочнения высоки и по всем направлениям соизмеримы с пределом текучести [17,20], в образцах после дополни-

тельной прокатки эти показатели резко падают, достигая при больших деформациях отрицательных значений.

Таблица 3

**Обобщенные результаты параметров упрочнения образцов титана, продеформированных РКУП и дополнительно прокатанных до разных степеней деформации**

Деформирование		Направление сжатия	Механические свойства, МПа		
			$\sigma_{02}$	$\sigma_{10}$	$\theta_{VI}$
РКУП	$e = 0.4$	X	742	910	530
		Y	769	890	500
		Z	998	1065	–
	$e = 0.7$	X	665	930	195
		Y	865	1015	400
		Z	1200	1298	–
Дополнительная прокатка, $e = 1.25$	симметричная	X	788	950	–500
		Y	874	1129	703
		Z	1154	1231	–
	асимметричная	X	727	847	–400
		Y	771	928	226
		Z	1170	1207	–

*Примечание.* Направления сжатия: X, Y – соответственно вдоль и перпендикулярно направлению прокатки, Z – вдоль направления редукции.

Обращает на себя внимание, что после асимметричной прокатки образцы демонстрируют более низкие, чем после симметричной, значения предела текучести и деформирующего напряжения при 10% деформации ( $\sigma_{10}$ ) по всем направлениям сжатия. Более того, при испытаниях на растяжение (рис. 7) номинальные кривые нагружения образца, продеформированного симметричной прокаткой, выше, чем у подвергнутого асимметричной прокатке.

В табл. 4 представлены результаты механических испытаний на растяжение исследованных образцов. Здесь кроме стандартных механических характеристик ( $\sigma_{02}$  – предел текучести,  $\sigma_{alt}$  – предел прочности,  $\delta_{unif}$  – равномерное удлинение,  $\psi$  – относительное сужение) представлены значения параметров деформационного упрочнения:  $\sigma_{ist}$  – истинное напряжение в момент разрушения,  $e_{fr}$  – истинная деформация разрушения, а также значения модуля пластичности  $N$ , который рассчитывается из истинной диаграммы нагружения по формуле

$$N = \left( \sigma_{ist} - \sigma_{alt}^i \right) / \left( e_{fr} - e_{unif}^i \right),$$

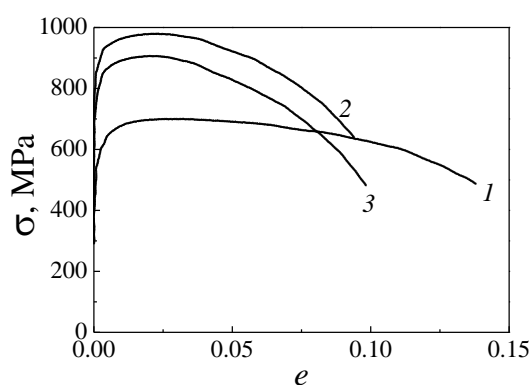
где  $\sigma_{alt}^i$  и  $e_{unif}^i$  – истинные значения соответственно предела прочности и равномерной деформации в момент шейкообразования.

Таблица 4

**Механические характеристики исследованных образцов, испытанных на одноосное растяжение**

Схема деформирования	$\sigma_{02}$	$\sigma_{alt}$	$\sigma_{ist}$	$e_{fr}$	$\psi, \%$	$N, \text{MPa}$	$\delta_{unif}, \%$	$\sigma_{02}/N$
	MPa							
РКУП	582	685	1139	0.98	60.4	544	4.5	0.81
РКУП + СП	890	960	1468	0.93	62.5	546.2	3	0.61
РКУП + АСП	809	890	1520	1.25	71.3	558.8	2.7	0.62

*Примечание.* СП, АСП – соответственно симметричная и асимметричная прокатка.



**Рис. 7.** Номинальные кривые растяжения деформированных образцов титана: 1 – РКУП; 2 – РКУП + симметричная прокатка,  $e = 1.25$ ; 3 – РКУП + асимметричная прокатка,  $e = 1.25$

Следует обратить внимание, что образец, подвергнутый только РКУП, существенно уступает по прочности дополнительно прокатанным образцам. Что касается равномерного удлинения, то для обоих типов прокатки его величина примерно одинакова ( $\delta_{unif} \sim 3\%$ ) и несколько ниже, чем после РКУП ( $\delta_{unif} = 4.5\%$ ). Спад диаграммы (рис. 7) на стадии шейкообразования у РКУП-образца значительно менее пологий, чем у дополнительно прокатанных, что косвенно свидетельствует о существенно более высоком

коэффициенте линейного упрочнения при растяжении. Это подтверждается расчетом модуля пластичности. Хотя рассчитанные значения для всех исследованных случаев примерно одинаковы:  $N \sim 550$  МПа, отношение этой величины к пределу текучести у образца, подвергнутого только РКУП, существенно выше и приближается к единице, что, как показано нами в работе [17], свидетельствует о малой склонности РКУ-титана к локализации. У образцов, дополнительно деформированных симметричной или асимметричной прокаткой, это отношение значительно ниже:  $N \sim 0.6$ , поэтому образцы, находящиеся в таких структурных состояниях, локализуются быстрее.

Совокупность данных, полученных при одноосных растяжении и сжатии, свидетельствует о том, что в описанном случае дополнительная симметричная или асимметричная прокатка в равной мере понижает деформационную

способность ИПД-образца. С другой стороны, максимальная нагрузка прокатных образцов существенно выше, чем у подвергнутых РКУП, что подтверждает известное положение о положительном влиянии прокатки именно на этот параметр.

Все эксперименты (сжатие по трем плоскостям и одноосное растяжение) указывают на более низкие значения напряжения после асимметричной прокатки. Это принципиальное отличие полученных результатов от данных работы [6] можно объяснить несколько иными параметрами асимметричной прокатки по сравнению с используемыми в цитируемой работе. Однако есть и другое объяснение, более важное с точки зрения развития теории ИПД. Напомним, что при интенсивной деформации, например прессовании углом, прирост упрочнения наблюдается лишь на первых проходах. Так, после прессования по схеме  $V_C$  прирост происходит только по достижении 6 проходов (по два в трех взаимно перпендикулярных направлениях), а последующие проходы практически не влияют на повышение прочности. По-видимому, интенсивные сдвиговые деформации по всем направлениям приводят к насыщению упрочнения уже на стадии РКУП. При асимметричной прокатке также реализуется сдвиговая компонента, поэтому будучи реализованной в образце, где вклад этой компоненты в упрочнение исчерпан, ее положительное действие нивелируется настолько, что продеформированный по данной схеме материал начинает проигрывать по комплексу свойств даже обычной прокатке.

Таким образом, представленные результаты механических испытаний свидетельствуют о несомненной перспективности использования метода асимметричной прокатки для получения титановых полос. Однако следует учитывать, что при использовании данной схемы распределение напряжений деформаций значительно сложнее, чем при симметричной прокатке. Для получения оптимальных структур и максимальных механических характеристик требуется тщательный выбор параметров деформирования, основанный на глубоком понимании процессов, происходящих в очаге деформации при такой схеме ИПД.

1. *В.М. Сегал, В.И. Резников, В.И. Копылов, Д.А. Павлик, В.Ф. Малышев*, Процессы пластического структурирования металлов, Наука і тэхніка, Минск (1994).
2. *V.I. Kopylov*, Proc. of NATO ARW, Moscow, Russia (1999), p. 23.
3. *Y. Beygelzimmer, V. Varyukhin, D. Orlov*, in: Proc. 2nd Int. Symp., Los Alamos National Laboratory Edition, Los Alamos (2002), pp. 234–238.
4. *Е.Г. Пашинская*, Физико-механические основы измельчения структуры при комбинированной пластической деформации, Вебер, Донецк (2009).
5. *К.А. Гогаев, В.С. Воробаев, Д.Г. Вербило, М.И. Даниленко, Ю.Н. Подрезов*, ФТВД **17**, № 1, 103 (2007).
6. *Yu. Zhu, X. Wu, G. Wu, M. Yang, M. Yang, Yu. Wei, X. Huang*, PNAS **112**, 14501 (2015).

7. К.А. Гогаев, В.С. Воропаев, Ю.Н. Подрезов, Д.Г. Вербилло, О.С. Коряк, Порошковая металлургия № 9/10, 11 (2012).
8. Ю.Н. Подрезов, Д.Г. Вербилло, Я.И. Евич, ФТВД **24**, № 1, 98 (2014).
9. Я.Е. Бейгельзимер, О.В. Михайлов, А.С. Сынков, М.Б. Штерн, Е. Олевский, ФТВД **18**, № 1, 69 (2008).
10. Я.Е. Бейгельзимер, О.В. Михайлов, А.С. Сынков, М.Б. Штерн, ФТВД **18**, № 3, 92 (2008).
11. Я.Е. Бейгельзимер, М.Б. Штерн, Т.А. Епифанцева, А.С. Сынков, ФТВД **19**, № 3, 120 (2009).
12. В.С. Воропаев, Технологические системы № 4 (61), 28 (2012).
13. К.А. Гогаев, Г.Я. Калуцкий, В.С. Воропаев, Порошковая металлургия № 5/6, 35 (2009).
14. Г.А. Виноградов, В.П. Каташинский, Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул, Металлургия, Москва (1979).
15. К.А. Гогаев, В.А. Назаренко, В.А. Воропаев, Ю.Н. Подрезов, Д.Г. Вербилло, А.Ю. Окунь, Порошковая металлургия № 11/12, 51 (2009).
16. Ю.Н. Подрезов, Н.И. Даниленко, Е.Н. Борисовская, Н.П. Бродниковский, Н.В. Минаков, С.А. Фирстов, Металлофиз. новейшие технол. **26**, 659 (2004).
17. Ю.Н. Подрезов, В.И. Даниленко, Н.И. Даниленко, ФТВД **25**, № 2, 90 (2015).
18. R.Z. Valiev, T.G. Langdon, Progress in Materials Science **51**, 881 (2006).
19. Ю.Н. Подрезов, Е.М. Борисовская, Д.Г. Вербилло, В.А. Писаренко, Я.И. Евич, В.И. Копылов, ФТВД **17**, № 2, 110 (2007).
20. Ю.Н. Подрезов, В.И. Даниленко, в сб.: Электронная микроскопия и прочность материалов, ИПМ НАН Украины, Киев (2009), вып. 16, с. 67–78.

*K.O. Gogaev, V.S. Voropaev, Yu.N. Podrezov, Ya.I. Yevych, V.I. Danilenko*

## PRODUCTION OF HIGHSTRENGTH TITANIC STRIPS BY CONSOLIDATION OF POWDER USING TECHNOLOGY OF ASYMMETRICAL ROLLING

The results of mechanical tests of titanium strips obtained by rolling of a powder are reported. The obtained data demonstrate the advantage of asymmetric rolling as compared to the symmetric one. It is found that after asymmetric rolling, the «green» strength of the strips is 5 times higher. After the sintering, the mechanical properties of powder strips are comparable with those obtained by rolling of compacts. Additional rolling by using of an asymmetric scheme gives an opportunity to obtain deformed tapes characterized by strength and ductility exceeding those of similar tapes obtained by the conventional technology. The role of shear deformation in the formation of contacts in the products of powder genesis is analyzed. The advantages and disadvantages of asymmetric rolling are discussed. The place of this scheme in general methodology of severe plastic deformation is determined.

**Keywords:** titanium strips, powder, asymmetric rolling, strength, ductility

**Fig. 1.** Scheme of roll grooving of the DUO mill: 1, 2 – roll grooves for the symmetric and asymmetric rolling, respectively

**Fig. 2.** Preliminary compression load dependence of the total compression load: 1, 2 – total compression load in the course of symmetric and asymmetric rolling, respectively

**Fig. 3.** Fracture of a titanium leaf because of overpress in the course of symmetric rolling

**Fig. 4.** Structure of the fracture surface of a rolled stock formed by symmetric (*a*) and asymmetric (*b*) rolling

**Fig. 5.** Results of flexure tests of green stripes formed by asymmetric (1) and symmetric (2) rolling

**Fig. 6.** Fracture surface of powder titanium stripes after uniaxial tensile tests after the rolling: *a*, *b* – symmetric rolling in longitudinal and transversal direction, respectively; *в*, *г* – asymmetric rolling in longitudinal and transversal direction, respectively

**Fig. 7.** Nominal elongation curves of deformed titanium samples: 1 – ECAP; 2 – ECAP + symmetric rolling,  $e = 1.25$ ; 3 – ECAP + asymmetric rolling,  $e = 1.25$