

PACS: 62.20.-x

К.А. Гогаев, В.С. Воропаев, Д.Г. Вербило, Ю.Н. Подрезов,
М.И. Даниленко

ПРИМЕНЕНИЕ АСИММЕТРИЧНОЙ ПРОКАТКИ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ КОМПАКТНОГО И ПОРИСТОГО ТИТАНА

Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины
ул. Кржижановского, 3, г. Киев, 03680, Украина
E-mail: podrezov@materials.kiev.ua

Исследованы процессы упрочнения материалов, продеформированных в условиях прокатки со сдвигом, осуществляемой между валками разного диаметра. Изучен процесс консолидации в пористых порошковых заготовках титана, подвергнутых обычной и асимметричной прокатке. Установлено повышение прочности проката как из компактного, так и пористого титана при использовании асимметричной прокатки.

Введение

При интенсивной пластической деформации методами равноканального-но углового прессования, винтовой экструзии или торсионного скручивания процесс повторного нагружения, изменяющий схему деформирования, осуществляется только после полного снятия первичной нагрузки. В этом случае микроструктура, возникшая при первичном нагружении, находится в релаксированном состоянии, а в формировании структуры на втором и последующих проходах участвует лишь та небольшая часть дислокаций, которая сохранилась в кристалле после снятия нагрузки. Теоретические и экспериментальные работы, посвященные закономерностям структурообразования в сильнодеформированных материалах [1,2], свидетельствуют о целесообразности и необходимости разработки новых методов интенсивной деформации материалов, где различные схемы деформации совмещаются в одной технологической операции.

В.Н. Выдриным [3] был предложен новый технологический процесс прокатки, активирующий сдвиговые деформации. Сущность процесса (рис. 1) заключается в деформации полосы между валками одинакового диаметра, которые вращаются с различными скоростями $V_2 > V_1$. К концам полосы прикладывается натяжение. При этом скорость заднего конца полосы авто-

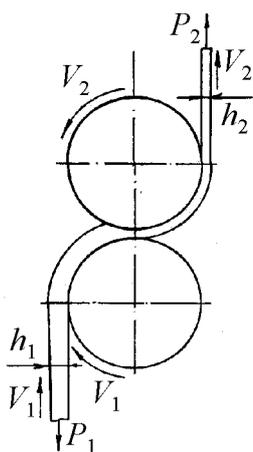


Рис. 1. Схема процесса прокатки–волочение

матически поддерживается равной окружной скорости V_1 ведомого валка, а скорость переднего конца – равной окружной скорости V_2 ведущего валка. Это приводит к появлению 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.

В данной работе исследованы процессы упрочнения материалов, продеформированных в условиях прокатки со сдвигом между валками разного диаметра. Асимметричная прокатка совмещает в одной схеме деформирования процессы собственно прокатки (осуществляющиеся в основном за счет трансляционного механизма деформации) и сдвига (за счет реализации ротационного механизма).

Эксперименты выполняли на компактных (рекристаллизованных) образцах титана технической чистоты. Кроме того, поскольку сдвиговая деформация активизирует процесс образования качественного межчастичного контакта в порошковых материалах, исследовали процесс консолидации в пористых порошковых заготовках титана, подвергнутых обычной и асимметричной прокатке.

Материал и методика

В качестве объекта исследования нами были выбраны образцы рекристаллизованного титана технической чистоты, а также порошкового титана пористостью 30%, предварительно спеченного в вакууме при температуре 1100°C. Исходные образцы прокатывали на стане ДУО традиционным способом, когда валки одного диаметра вращаются с одной и той же скоростью, и асимметричной прокаткой. В случае традиционной прокатки диаметр валков $\varnothing = 210$ mm, а при асимметричной прокатке – $\varnothing_1 = 190$ mm и $\varnothing_2 = 230$ mm. Оба эксперимента осуществляли в идентичных условиях: величину исходного зазора между валками подбирали одинаковой, скорость, степень и температуру деформации – сопоставимыми. В обоих экспериментах с помощью месдоз фиксировали общее усилие прокатки. Образцы прокатывали по указанным схемам при температурах 20–300°C с целью получения дисперсной структуры и реализации явления динамического возврата.

Полученные после прокатки образцы испытывали на изгиб с записью диаграммы нагружения. Исследовали влияние условий прокатки на упругие характеристики, параметры упрочнения, напряжение и деформацию в момент разрушения. Методом просвечивающей электронной микроскопии анализировали структуру материала в деформированном состоянии.

Результаты экспериментов

Прокатка компактных образцов. Заготовкой под прокатку служила полоса технически чистого титана размерами 3×20 mm, предварительно отожженная при 800°C на размер зерна $50 \mu\text{m}$. Прокатку осуществляли за 1 проход, поэтому финишный размер (толщина) полосы после прокатки определялся не только установленным зазором между валками, но и жесткостью клетки и упругим прогибом валков. В таблице приведены данные о геометрических размерах полосы (h_1 и h_2 – соответственно начальная и конечная толщина полосы), а также о технических параметрах прокатки (T_{roll} – температура, P_B – усилие прокатки, e – степень деформации). Следует отметить тот факт, что практически при равных усилиях прокатки асимметричный способ прокатки обеспечивает увеличение степени деформации на 15–17% по сравнению с традиционным, что свидетельствует о более благоприятной схеме напряженно-деформированного состояния в очаге деформации.

Таблица

Параметры прокатки полос технически чистого титана

| $T_{\text{roll}}, ^\circ\text{C}$ | h_1 | h_2 | P_B, kN | e |
|-----------------------------------|-------|-------|------------------|-------|
| Асимметричная прокатка | | | | |
| 20 | 2.95 | 1.7 | 520 | 0.551 |
| 100 | 3.1 | 1.8 | 520 | 0.545 |
| 200 | 3.0 | 1.7 | 480 | 0.568 |
| 300 | 3.05 | 1.8 | 480 | 0.527 |
| Традиционная прокатка | | | | |
| 20 | 2.95 | 2.05 | 560 | 0.364 |
| 100 | 3.05 | 2.18 | 560 | 0.336 |
| 200 | 2.9 | 2.15 | 500 | 0.299 |
| 300 | 3.0 | 2.0 | 480 | 0.405 |

Результаты механических испытаний образцов на 4-точечный изгиб, продеформированных по обеим схемам, представлены в виде кривых деформационного упрочнения (рис. 2). Сопоставление механических свойств материалов, прокатанных при температурах $20\text{--}300^\circ\text{C}$, свидетельствуют о том, что упрочнение материала, подвергнутого асимметричной прокатке (рис. 2,а), примерно на 25% выше, чем у материала, продеформированного традиционным способом (рис. 2,б). Особо следует обратить внимание на аномально высокое упрочнение образца, продеформированного способом асимметричной прокатки при 200°C . Свойства такого образца примерно в 1.6 раза выше, чем после традиционной прокатки (ср. кривые 3 на рис. 2а,б).

Причина этого связана, по-видимому, с задержкой процессов динамического возврата при асимметричной прокатке. В наших предыдущих работах [4,5] обращалось внимание на особое механическое поведение сильнодеформированного титана при температурах выше 200°C . Оно проявляется как в аномальном понижении температурной зависимости предела текучести,

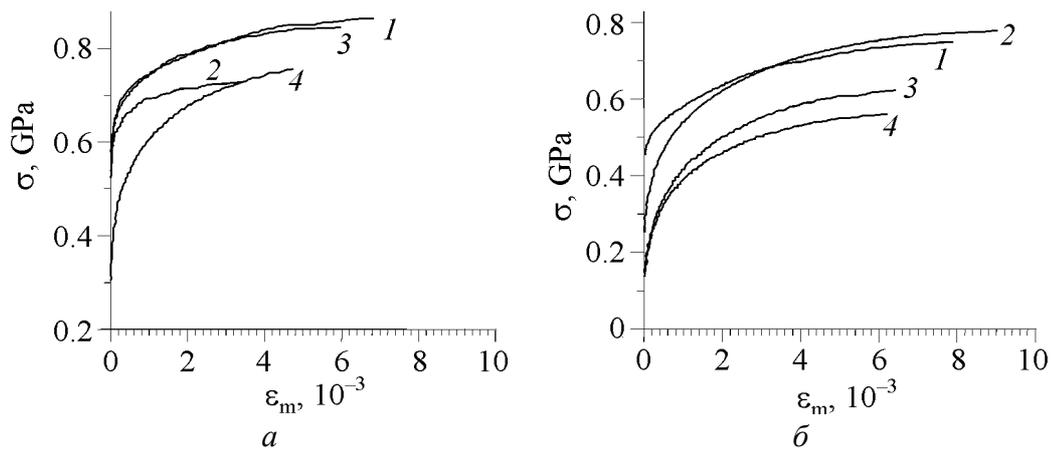


Рис. 2. Кривые микропластичности титана, продеформированного по схемам асимметричной (а) и традиционной (б) прокатки при разных температурах, °С: 1 – 20, 2 – 100, 3 – 200, 4 – 300

так и в снижении параметров низкотемпературного упрочнения образцов, продеформированных при таких температурах. Мы связывали этот эффект с особенностями формирования структуры в сильнодеформированных материалах и склонностью этой структуры к релаксации и частичному распаду под действием процессов возврата.

Объединение в одной технологической операции трансляционной и ротационной деформаций, по-видимому, способствует частичному подавлению этих процессов, что приводит как к повышению параметров упрочнения при всех исследованных температурах прокатки, так и смещению температуры разупрочнения в область более высоких значений. Задержка процессов термомеханического возврата деформационной структуры при температурах 200–300°С может способствовать активизации на границах деформированных зерен процессов низкотемпературной динамической рекристаллизации, формирующей сверхмелкое зерно с равновесными границами. Наличие сверхмелких рекристаллизованных зерен было обнаружено методом просвечивающей электронной микроскопии в образце, продеформированном в условиях асимметричной прокатки при температуре 200°С (рис. 3).

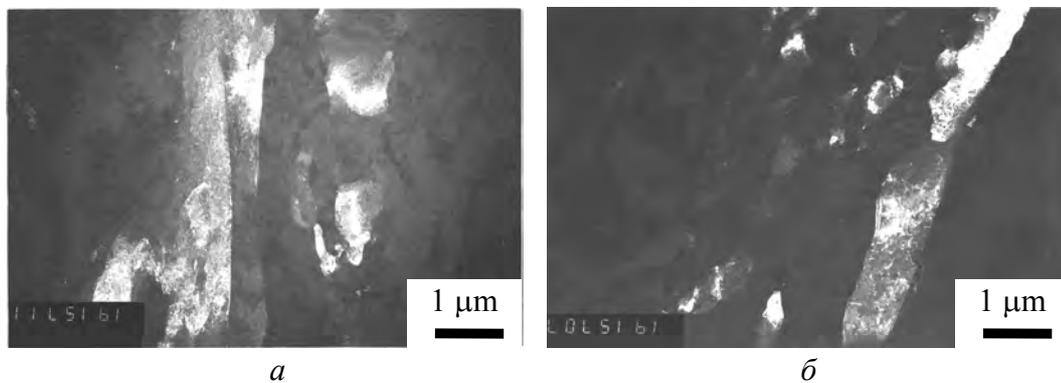


Рис. 3. Структура титанового сплава после традиционной (а) и асимметричной (б) прокатки при температуре 200°С

Прокатка пористых заготовок. Для исследования влияния условий прокатки на закономерности упрочнения пористых порошковых материалов был выполнен ряд экспериментов на пористом спеченном титане технической чистоты. Исходным материалом служили заготовки спеченного при температуре 1100°C порошкового титана размером $2 \times 20 \times 150$ mm с начальной пористостью $\theta_0 = 30\%$. Эти заготовки прокатывали при температурах 20–300°C по тем же схемам, что и описанный выше компактный титан.

Результаты исследований (рис. 4) показывают, что после асимметричной прокатки параметры упрочнения резко возрастают. Причем образцы, прокатанные при 200 и 300°C (кривые 3, 4), проявляют максимальное упрочнение, соизмеримое с упрочнением компактных образцов (см. рис. 2). Образцы после асимметричной прокатки имеют намного более высокие модуль упругости и уровень деформации до разрушения, что свидетельствует о лучшем качестве контакта. После прокатки пористость образцов составляет 8–10%, суммарная степень деформации твердой фазы достигает $e = 0.5\text{--}0.6$, что соизмеримо с деформацией компактного материала (таблица).

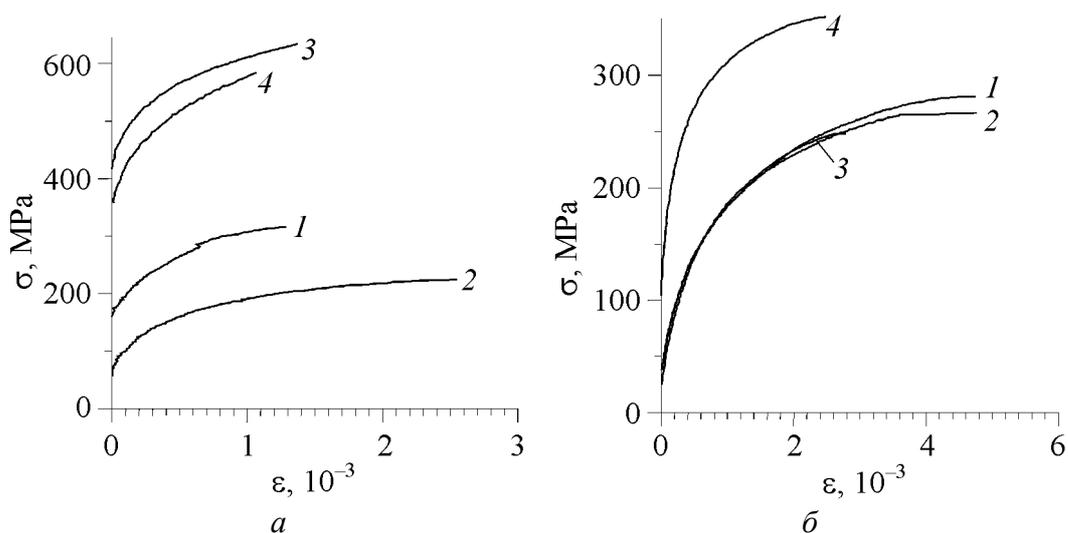


Рис. 4. Кривые микропластичности порошкового титана, повторно подвергнутого асимметричной (а) и традиционной (б) прокатке при разных температурах, °C: 1 – 20, 2 – 100, 3 – 200, 4 – 300

Характерно, что при большой деформации эффект упрочнения образцов, подвергнутых асимметричной прокатке, заметно выше, чем для образцов, продеформированных по традиционной схеме. Первые образцы имеют также заметно более высокую пластичность, достигающую нескольких процентов, хотя следует все же отметить, что их пластичность во много раз ниже, чем у компактных рекристаллизованных образцов, продеформированных до тех же степеней деформации.

Резкое увеличение параметров упрочнения порошковых образцов, продеформированных асимметричной прокаткой до больших степеней при темпера-

турах 200–300°C, объясняется протеканием одновременно двух процессов: формирования деформационной структуры и активизации процесса контактообразования. Несомненно, что процессы структурной перестройки особенно активно протекают в области межчастичных граней, где происходит наибольшая концентрация деформации. Несмотря на низкую температуру прокатки, ввиду сильной концентрации деформации возможно протекание процессов динамической рекристаллизации с полным восстановлением свойств контакта.

В данном случае сдвиговая деформация не только позволяет реализовать более сильное упрочнение материала (как это наблюдалось для компактного материала), но и оказывает положительное влияние на образование более совершенного контакта. Косвенным подтверждением этого предположения являются резкое возрастание модуля упругости материалов, имеющих наибольшее упрочнение, и наличие вязких участков на изломах этих образцов.

Выводы

1. Упрочнение компактного титана, подвергнутого асимметричной прокатке, примерно на 25% выше, чем у материала, продеформированного традиционным способом. Причина такого поведения, по-видимому, связана с задержкой процессов динамического возврата в первом случае.

2. После деформации пористых образцов, подвергнутых асимметричной прокатке, параметры упрочнения резко возрастают. При этом образцы, прокатанные при 200 и 300°C, проявляют максимальное упрочнение, соизмеримое с упрочнением компактных образцов.

3. Активизация процесса динамической рекристаллизации при асимметричной прокатке не только способствует повышению параметров упрочнения, но также ведет к улучшению качества межчастичного контакта при прокатке порошковых заготовок.

4. Сравнительный анализ процессов упрочнения компактного и пористого титана позволяет сделать заключение, что в порошковых изделиях использование асимметричной прокатки более эффективно, поскольку в этом случае наряду с улучшением деформационной субструктуры матрицы удается существенно улучшить качество межчастичных контактов.

1. *V.N. Varyukhin, Y.Y. Beygelzimer, B.M. Efros, O.V. Prokof'eva, V.P. Pilyugin*, ФТВД **14**, № 4, 9 (2004).
2. *Е.Г. Пашинская, В.Н. Варюхин, И.В. Лейрих, М.А. Антонова, И.И. Тищенко, В.М. Ткаченко*, ФТВД **14**, № 4, 76 (2004).
3. *В.Н. Выдрин, В.Я. Гольдштейн, Л.М. Агеев, С.М. Владимиров, Г.Е. Трусов*, ФММ **41**, № 3, 46 (1976).
4. *С.А. Фирстов, Ю.Н. Подрезов, Н.И. Даниленко, Е.Н. Борисовская, Н.В. Минаков*, ФТВД **13**, № 3, 37 (2003).
5. *Ю.Н. Подрезов, Н.И. Даниленко, Е.Н. Борисовская, Н.П. Бродниковский, Н.В. Минаков, С.А. Фирстов*, Металлофиз. новейшие технол. **26**, 659 (2004).

K.A. Gogayev, V.S. Voropayev, D.G. Verbilov, Yu.N. Podrezov, M.I. Danilenko

USAGE OF ASYMMETRICAL ROLLING FOR STRENGTHENING COMPACT AND POROUS TITANIUM

Strengthening of materials deformed by rolling with shear between rolls of different diameters has been investigated. The strengthening of compact and porous titanium deformed by traditional and asymmetric rolling was analysed. The increasing of strength and plasticity of compact titanium after asymmetrical rolling was observed. The improvement of compact quality with sharp increasing strength and plasticity for porous titanium deformed by asymmetrical rolling was observed.

Fig. 1. Scheme of the rolling-drawing process

Fig. 2. Curves for titanium deformation by asymmetrical (*a*) and traditional (*b*) rolling under different temperatures, °C: 1 – 20, 2 – 100, 3 – 200, 4 – 300

Fig. 3. Structure of titanium alloy after traditional (*a*) and asymmetrical (*b*) rolling at a temperature of 200°C

Fig. 4. Microplasticity curves for powder titanium after repeated asymmetric (*a*) and traditional (*b*) rolling at different temperatures, °C: 1 – 20, 2 – 100, 3 – 200, 4 – 300