

УДК 621.789.004

Лопатин Н. В.
Салищев Г. А.**ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
И МИКРОСТРУКТУРЫ ПРУТКОВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 ПРИ
РАДИАЛЬНО-СДВИГОВОЙ ПРОКАТКЕ**

Радиально-сдвиговая прокатка (РСП) является перспективным процессом получения горячего проката повышенной точности из легированных сталей и сплавов [1]. В частности, этот процесс широко применяется при изготовлении прутков из титановых сплавов [2]. Обычно прокатка титановых сплавов осуществляется при температурах нагрева заготовки, соответствующих β -области. В этом случае обеспечивается высокая деформируемость материала при низких напряжениях течения. При этом микроструктура сплавов после прокатки крупнозернистая пластинчатая, тогда как для ряда применений важно получение глобулярной структуры в прутках. В литературе отсутствуют данные о параметрах процесса РСП для получения глобулярной микроструктуры в прутках титановых сплавов. Для ее формирования требуется снижение температуры прокатки в $\alpha + \beta$ -область, а также регламентируется интенсивность накопленной пластической деформации [3]. Подчеркнем, что деформация в условиях РСП преимущественно локализована в поверхностном слое, чему также способствует неизбежное подстуживание, поэтому для формирования наиболее однородной структуры по сечению прутка требуется достижение наибольшей деформации в центре. Среди факторов, сдерживающих применение РСП в условиях пониженных температур обработки в $\alpha + \beta$ -области, следует также выделить отсутствие достаточной информации о напряженно-деформированном состоянии (НДС) в очаге деформации и особенностях формирования микроструктуры титановых сплавов. Недостаток этих данных затрудняет разработку эффективных режимов прокатки для получения прутков с глобулярной структурой с регламентированными параметрами.

Целью работы является получение данных о параметрах процесса РСП путем проведения его математического моделирования методом конечных элементов и сопоставления их с результатами оценки структурного состояния прутков двухфазного титанового сплава ВТ6 после прокатки при температурах $\alpha + \beta$ -области.

Прутки диаметром 40 мм из титанового сплава ВТ6 были взяты в состоянии поставки согласно ОСТ1 90173-75. Химический состав сплава (вес. %): Al 6,46; V 3,84; Zr 0,02; Si 0,01; Fe 0,083; C 0,005; O₂ 0,166; N₂ 0,003; H₂ 0,003. Температура полиморфного превращения составила 995 °С. Перед прокаткой прутки были закалены от температуры 1050 °С в воду, что обеспечило получение перед прокаткой типичной для двухфазных титановых сплавов пластинчатой микроструктуры.

Прокатку проводили на стане РСП 14-40 с предварительным нагревом заготовок до температуры 940 °С, которая соответствует $\alpha + \beta$ -области структурного состояния. Заготовку прокатывали в три этапа: каждый этап прокатки включал два прохода с промежуточным подогревом до начальной температуры. Значения коэффициентов вытяжки на каждом этапе представлены в табл. 1. После каждого этапа прокатки проводили вырезку образцов для исследования микроструктуры. Суммарный коэффициент вытяжки составил $K_B = 3$.

Исследования микроструктуры после прокатки проводили на вырезанных вдоль направления прокатки образцах, в точках расположенных на оси прутка и на расстоянии от оси равном 0,9 от радиуса.

Металлографические исследования исходных и деформированных образцов были выполнены с использованием металлографического микроскопа «Olympus GX-51» со специализированной программой анализа изображения «Image Scope M». Средний размер зерна оценивали методом случайных секущих в соответствии с ГОСТ 21073.3-75. Для уточнения

микроструктурного состояния был использован метод анализа дифракции обратно рассеянных электронов (EBSD) реализованный на растровом микроскопе «Quanta 200-3D». Шаг сканирования при EBSD выбирали из условия расположения не менее 10 точек в продольном сечении зерна. Идентификация глобулярных зерен проводилась по соотношению их продольного и поперечного размера не более 2:1. Объемная доля глобулярных зерен определялась с использования точечного метода, с наложением сетки с ячейкой 5 мкм.

Таблица 1

Этапы радиально-сдвиговой прокатки сплава ВТ6

№	Температура нагрева образца, С°	Общий коэффициент вытяжки	Количество проходов
1	940	1,25	2
2	940	1,56	2
3	940	1,56	2

Подготовку образцов для металлографии и анализа картин EBSD проводили шлифованием на шкурке различной дисперсности с водяным охлаждением. Полирование осуществляли с использованием жидких суспензий. Электролитическое полирование проводили с использованием электролита 80 % $(\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$, 20 % HClO_4 при напряжении 25 В. Травление $\alpha + \beta$ -фаз микроструктуры осуществляли с использованием состава: $\text{HF} - 20$ частей, $\text{HNO}_3 - 1$ часть.

Математическое моделирование РСП проводили методом конечных элементов с использованием программного продукта «LS-DYNA». Реологическая модель материала с учетом скоростного и деформационного упрочнения была задана табличным методом, для температуры деформации 940 °С. Значения напряжений течения были заданы в соответствии с результатами работы [4]. Геометрические параметры процесса соответствовали конструкции прокатного стана РСП 14-40 [5, 6]: угол подачи $\beta = 20^\circ$, угол раскатки $\alpha = 7^\circ$.

Начальные и граничные условия моделирования:

1. Валки твердотельные, с ограничением перемещения по локальным осям координат X, Y, Z и ограничениям вращения вокруг осей X, Y кроме оси вала Z .
2. Коэффициент трения по Кулону 0,3.
3. Температурные условия изотермические.
4. Угловая скорость вращения валков постоянная, равна $3,7 \text{ с}^{-1}$.
5. Заготовка подается в очаг деформации с начальной скоростью 10 мм/с.

Значение коэффициента вытяжки заготовки K_B при прокатке определяли согласно уравнению (1):

$$K_B = \left(\frac{D}{d} \right)^2, \quad (1)$$

где D – диаметр исходной заготовки, мм;

d – диаметр прокатанной заготовки, мм.

Анализ параметров НДС проводили в областях расположенных на оси прутка и на расстоянии от оси равном 0,9 от радиуса. Напряженное состояние при деформации оценивали с интервалом времени $\Delta t = 0,025 \text{ с}$ с использованием параметра K :

$$K = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{T}, \quad (2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, МПа;

T – интенсивность касательных напряжений, МПа.

Расчет распределения среднего значения коэффициента напряженного состояния в процессе деформации K_{cp} рассчитывали из уравнения:

$$K_{cp} = \left(\sum_0^n K \right) / n, \quad (3)$$

где n – количество расчетных точек в интервале времени прохождения, выбранного участка очага деформации.

Оценка адекватности математической модели РСП проведена путем сравнения расчетного значения угла скручивания со значением, полученным в результате эксперимента. Отклонение составило не более 5 %.

Для анализа НДС при РСП была построена конечно-элементная модель изотермической прокатки. В результате полученных при моделировании данных была проведена оценка распределения скоростей деформации, интенсивности накопленной пластической деформации и напряженного состояния в поперечном сечении прутка.

Установлено, что при прокатке с $K_B = 1,25$ интенсивность скорости деформации в центральных слоях заготовки плавно возрастает, при прохождении деформирующего участка валков до значений $0,34 \text{ с}^{-1}$, затем снижается при прохождении калибрующего участка валков. По мере приближения к периферии прутка амплитуда скорости достигает значений $5...6 \text{ с}^{-1}$, характер изменения скорости деформации изменяется на циклический с периодом $0,6 \text{ с}$. Число циклов деформации на поверхности для $K_B = 1,25$ равно 2.

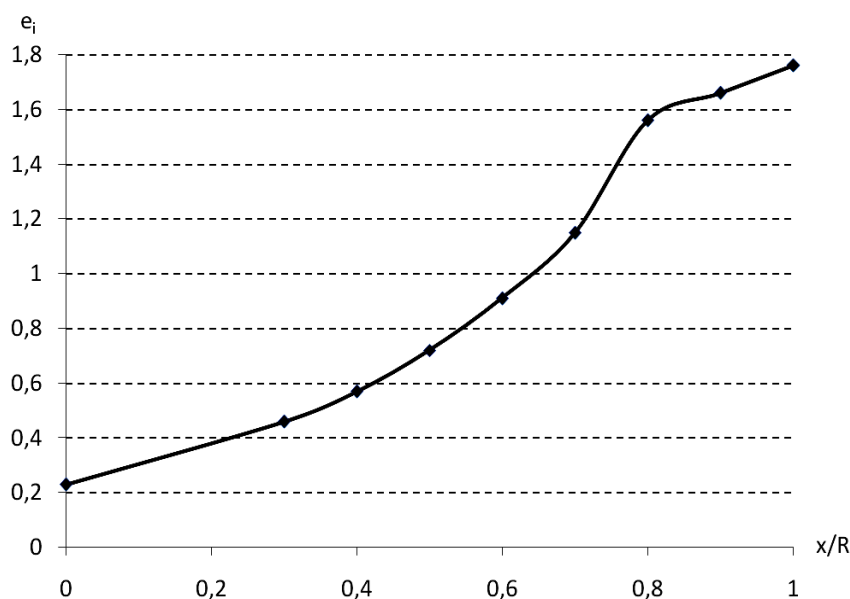


Рис. 1. Распределение интенсивности деформации по сечению прутка сплава ВТ6 после прокатки при $T = 940 \text{ }^\circ\text{C}$ с коэффициентом вытяжки $K_B = 1,25$

На рис. 1 показано распределение значений интенсивности пластической деформации по сечению прутка при $K_B = 1,25$. Видно, что распределение интенсивности деформации неоднородно. Максимальное значение на поверхности составило 1,76, а минимальное значение в центральной области – 0,23. Согласно результатам [4] монотонная деформация со значением $e_i = 1,1$ и скоростью деформации $0,34 \text{ с}^{-1}$ приведет к образованию 60 % объемной доли глобулярной структуры. Обеспечить это значение интенсивности деформации возможно при прокатке с $K_B = 3$. Существенно более высокое значение интенсивности деформации на периферии прутка, которое составит $e_i = 8,8$ при скорости деформации $5...6 \text{ с}^{-1}$ после $K_B = 3$, должно привести, по-видимому, к полной глобуляризации структуры. В данном случае стоит отметить возможное влияние на глобуляризацию увеличения скорости деформации. Очевидно, что

увеличение скорости деформации будет вести к замедлению этого контролируемого диффузией процесса. В тоже время из результатов работы [4] такого влияния скорости деформации на глобуляризацию следует ожидать в более низком скоростном интервале 10^{-4} – 10^{-1} с $^{-1}$.

Моделирование показало, что изменение показателя напряженного состояния K носит циклический характер, его значения расположены в интервале $-10,3 < K < 3,9$. В точке, расположенной на расстоянии от центра прутка равном 0,9 от радиуса интервал значений параметра K изменяется в области $-10,3 < K < 1,23$, при этом отрицательные значения соответствуют моменту деформирования валками области расположенной в окрестности данной точки. Среднее значение параметра напряженного состояния составило $-1,1$. Положительные значения параметра напряженного состояния соответствовали моменту деформации, при котором деформируемый участок располагался в области свободной от контакта с валками, а скорость пластической деформации минимальна. Подобный характер распределения параметра напряженного состояния обуславливает высокую деформируемость материала в процессе РСП, так как преимущественная деформация происходит в условиях высокого гидростатического давления. Очевидно, что циклический характер деформирования будет оказывать влияние на кинетику формирования глобулярной структуры. Согласно данным исследований по анализу знакопеременного деформирования на кинетику формирования глобулярной структуры в титановом сплаве ВТ6, при таком характере деформирования, в отличие от монотонного, увеличиваются значения накопленной интенсивности пластической деформации необходимые для формирования глобулярных зерен: при $e_i = 0,7$ образуется 5 % глобулярной структуры, а и при $e_i = 2$ –50 % [7]. Это связано, как с возможной реализацией механизма возврата структуры за счет действия эффекта Баушингера, так и неизбежного отжига сплава в промежутках между циклами деформации и этапами прокатки. Поэтому в связи с действием процессов, указанных выше, следует ожидать замедления глобуляризации при РСП по сравнению с монотонной деформацией.

В окрестности точки расположенной на оси прутка параметр напряженного состояния также изменяется. Область изменения значений параметра составляет $-0,27 < K < 3,9$, при этом характер изменений значений монотонный. Среднее значение параметра напряженного состояния составило 0,73, что соответствует значению характерному для процессов прокатки. Отсюда следует, что кинетика формирования глобулярных зерен в центральной области прутка будет подобна наблюдаемой при монотонной деформации.

Таким образом, при РСП глобуляризация структуры протекает неравномерно, в том числе из-за цикличности деформации на периферии и ее монотонного характера в центре прутка.

Структура титанового сплава ВТ6 после закалки из β -области состояла из мартенситных колоний со средним размером зерен 800 ± 100 мкм. Выдержка образцов при температуре $\alpha + \beta$ -области 940 °С и последующее охлаждение на воздухе привели к распаду мартенсита и образованию пластинчатой структуры (рис. 2) со средним значением толщины пластин α -фазы – 3 мкм.

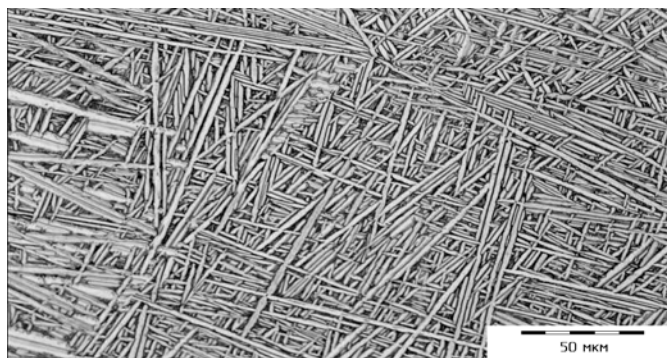


Рис. 2. Микроструктура титанового сплава ВТ6 после закалки из β -области и последующего нагрева до 940 °С с охлаждением на воздухе

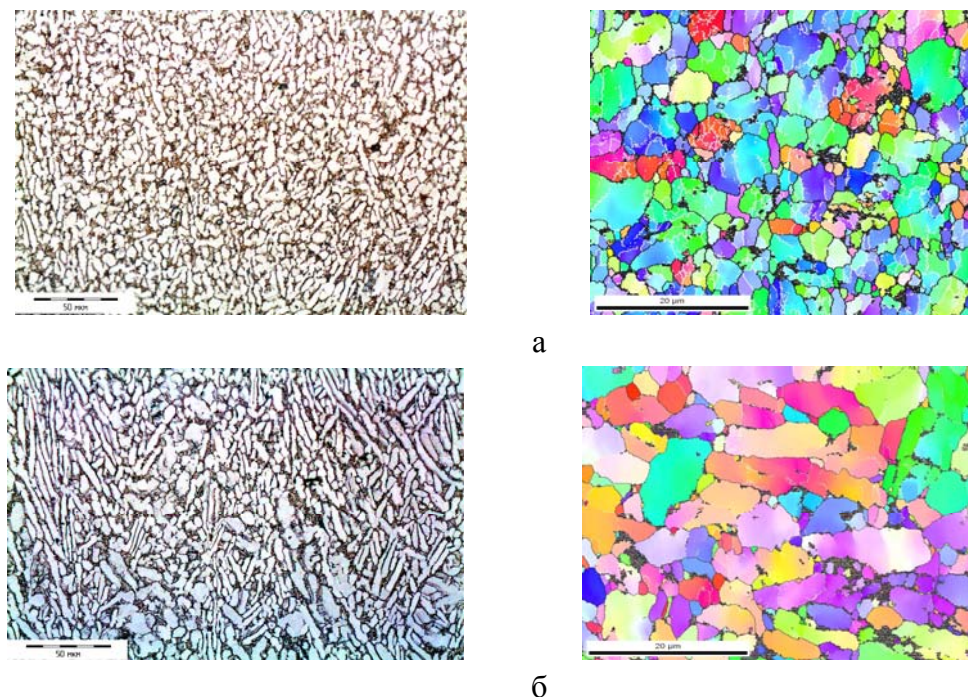


Рис. 3. Микроструктура прутка после третьего этапа прокатки:
а – периферия; б – центр; слева – оптическая микроскопия; справа – EBSD

Исследование микроструктуры образцов после первого этапа прокатки показало, что пластическая деформация в центральной области прутка ($e_i = 0,23$) не привела к образованию глобулярных зерен и дроблению пластин α -фазы. На периферии прутка наблюдались искривленные пластины α -фазы, частично раздробленные. Обнаружены глобулярные зерна, однако, их объемная доля менее 1 %. При этом рассчитанная интенсивность пластической деформации на периферии прутка составила 1,76. На втором этапе прокатки интенсивность накопленной деформации в центре была равна $e_i = 0,69$, а объемная доля глобулярных зерен составила только 4 %. В тоже время на периферии интенсивность деформации была равна $e_i = 5,28$ при 78 % объема глобулярных зерен. Третий этап прокатки увеличил значения накопленной интенсивности деформации в центральной области до 1,15 и 8,8 на периферии. В результате в центральной области было сформировано 31 % объемной доли глобулярной структуры в центральной области прутка и 95 % на периферии. Средний размер зерна α -фазы на периферии составил 10 мкм, в центре 13 мкм (рис. 3).

Результаты исследования микроструктуры показывают, что глобуляризация наиболее полно протекает на периферии прутка в отличие от его центральной части. Прокатка при $T = 940$ °С с общим коэффициентом вытяжки 3 приводит к трехкратному различию в объемной доле глобулярных зерен между периферией и центром прутка. Такая разница обусловлена как особенностями схемы НДС при РСП, так и характером деформирования, как это было рассмотрено выше: цикличностью деформации и влиянием на процессы возврата в микроструктуре промежуточных отжигов между этапами прокатки [8]. Нельзя исключить также влияние подстуживания заготовки. Однако, высокий деформационный разогрев заготовки при РСП во многом способен компенсировать потерю температуры. Так, например, в работе [1] показано, что в условиях деформационного разогрева потеря температуры вследствие подстуживания на стальном прутке диаметром 30 мм не превышала 15 градусов.

Таким образом, РСП двухфазного титанового сплава в $\alpha + \beta$ -области позволяет сформировать в нем глобулярную структуру со средним размером зерен α -фазы 10 мкм в большей части сечения прутка. Для получения более однородной микроструктуры требуется дальнейшее увеличение интенсивности деформации в центральной части прутка. С помощью математического моделирования можно рассчитать, сопоставляя с данными анализа микроструктуры прутка, требуемую величину деформации.

ВЫВОДЫ

Проведено математическое моделирование процесса РСП титанового сплава ВТ6 в $\alpha + \beta$ -области. Показано, что изменение показателя напряженного состояния K носит циклический характер, его значения расположены в интервале $-10,3 < K < 3,9$; на периферии прутка интервал изменений параметра K расположен в области $-10,3 < K < 1,23$, а в центральной части область изменения значений параметра составляет $-0,27 < K < 3,9$. Среднее значение параметра напряженного состояния за время деформации для периферии составило $-1,1$, а для центра прутка $0,73$.

Скорость деформации в центральных слоях заготовки при прохождении деформирующего участка валков возрастает до значений $0,34 \text{ с}^{-1}$, затем снижается при прохождении калибрующего участка валков. По мере приближения к поверхности заготовки амплитуда скорости достигает значений $5 \dots 6 \text{ с}^{-1}$, характер изменения скорости деформации изменяется на циклический с периодом $0,6 \text{ с}$.

Максимальное значение интенсивности деформации на периферии составляет $1,76$ при прокатке с $K_B = 1,25$, минимальное в центральной области $-0,23$.

Термомеханическая обработка с использованием РСП при суммарном коэффициенте вытяжки $K_B = 3$ и температуре деформации $940 \text{ }^\circ\text{C}$ приводит к формированию глобулярной микроструктуры со средним значением зерна α -фазы на периферии 10 мкм , в центре 13 мкм . При этом в центральной области было сформировано 31% объемной доли глобулярной структуры и 95% на периферии.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. Мероприятие 1.3.1 «Проведение научных исследований молодыми учеными-кандидатами наук», ГК № П2341 от 17 ноября 2009.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барыкин Н. П. Влияние технологических параметров радиально-сдвиговой прокатки на структуру стали 45 / Н. П. Барыкин, Н. В. Лопатин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 2007. – № 4. – С. 17–20.
2. Потапов И. Н. Технология винтовой прокатки / И. Н. Потапов, П. И. Полухин. – [2-е изд. перераб. и доп.]. – М.: Металлургия, 1990. – 344 с.
3. Формирование субмикроструктурной структуры в титановых сплавах интенсивной пластической деформацией / С. В. Жеребцов, Р. М. Галеев, О. Р. Валиахметов, С. П. Мальшева, Г. А. Салищев, М. М. Мышляев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. – 1999. – №7. – С. 17–22.
4. Semiatin S. L. Flow behavior and globularization kinetics during hot working of Ti-6Al-4V with a colony alpha microstructure / S. L. Semiatin, V. Seetharaman, I. Weiss // Materials Science and Engineering A. – 1999. – № 263. – P. 257–271
5. Пат. РФ №2009733, МКИ В21В1/00, В21В19/00. Способ получения круглых прутков прокаткой.
6. Пат. РФ №2038175, МКИ В 21 В 1/02, В 21 В 19/00. Способ получения прутков из легированных металлов и сплавов.
7. Bieler T. R. The origins of heterogeneous deformation during primary hot working of Ti-6Al-4V / T. R. Bieler, S. L. Semiatin // International Journal of Plasticity. – 2002. – №18. – P. 1165–1189.
8. Борисова Е. А. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов / Е. А. Борисова, Г. А. Бочвар, М. Я. Брун. – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.

Лопатин Н. В. – канд. техн. наук, науч. сотрудник БелГУ;

Салищев Г. А. – д-р техн. наук, проф. БелГУ.

БелГУ – Белгородский государственный университет, г. Белгород, Россия.

E-mail: lopatin@bsu.edu.ru