

Научная статья

УДК 669

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28204>



А.А. Стрельникова ✉

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

✉ strelnikova.angelina@bk.ru

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

Аннотация. В статье исследовано влияние степени горячей деформации на микроструктуру и механические свойства титанового сплава. Приведены структурные изменения и механические свойства титанового сплава 3М после горячей пластической деформации со степенями 80%, 84%, 86%, 90%, 93%. Установлены закономерности влияния основного параметраковки – степени горячей деформации – на комплекс механических свойств титанового сплава 3М. Получены закономерности влияния основного параметраковки (степени горячей деформации) на структуру сплава 3М. Описана зависимость влияния параметра обработкиковки (степени горячей деформации) на конечные кратковременные свойства сплава 3М. Таким образом, получена полная картина всего процесса. Полученные результаты исследования позволяют существенно углубить знания о связи структурного состояния и механических свойств титанового сплава.

Ключевые слова: титановый сплав,ковка, степень горячей деформации, механические свойства, микроструктура, оптическая микроскопия.

Для цитирования:

Стрельникова А.А. Влияние степени деформации на формирование микроструктуры и механических свойств титанового сплава // *Материаловедение. Энергетика.* 2022. Т. 28, № 2. С. 43–56. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28204>



A.A. Strelnikova ✉

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia✉ strelnikova.angelina@bk.ru

INFLUENCE OF DEFORMATION DEGREE ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY

Abstract. In the article, the influence of the degree of hot deformation on the microstructure and mechanical properties of titanium alloy is studied. Structural changes and mechanical properties of 3M titanium alloy after hot plastic deformation of 80%, 84%, 86%, 90%, 93% degrees are given. The regularities of the effect of the main forging parameter, the degree of hot deformation, on the complex of mechanical properties of the 3M titanium alloy are established. Regularities of the effect of the main forging parameter (degree of hot deformation) on the structure of the 3M alloy are obtained. The dependence of the influence of the forging processing parameter (degree of hot deformation) on the final short-term properties of the 3M alloy is described. Thus, a complete picture of the entire process is obtained. The obtained results of the study make it possible to significantly deepen the knowledge about the relationship between the structural state and the mechanical properties of titanium alloy.

Keywords: titanium alloy, forging, degree of hot deformation, mechanical properties, microstructure, optical microscopy.

Citation:

A.A. Strelnikova, Influence of deformation degree on microstructure and mechanical properties of titanium alloy, *Materials Science. Power Engineering*, 28 (02) (2022) 43–56, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28204>

Введение. Титановые сплавы являются перспективными материалами, применение которых в разных областях промышленности возрастает [1–6]. Большое количество работ посвящено изучению влияния термической обработки, химико-термической обработки, пластической деформации на механические свойства и структуру титановых сплавов [6–21].

Одной из важных задач в процессе эксплуатации машин и иного оборудования, особенно в различных климатических условиях, является возможность оценки (прогноза) его состояния. При этом важное значение приобретает знание структурного состояния и физико-механических свойств деталей, а также технологических процессов их получения [22–23]. Все это в значительной степени позволит с высокой степенью достоверности прогнозировать надежность машин и оборудования в процессе эксплуатации.

На заводе – зазчике используются прутки диаметрами 90–30 мм. Поэтому мы и исследуем заготовки данного диаметра и их свойства. На заводе в качестве исходного материала был выбран слиток круглого сечения диаметром 450 мм, который затем подвергали операции протяжки с разной степенью деформации. По технологическому процессу его необходимо последовательно ковать так как, если из слитка 450 мм сразу протянуть прутки на диаметр 90 мм, то получим очень большую степень деформации 500% и, возможно, растрескивание прутка. Также при протяжке от 450 мм до 90 мм время деформирования большое и температура заготовки снижается сильно.

Требованиями заказчика были изготовления прутков диаметрами 90 мм, 70 мм, 65 мм, 45 мм и 30 мм. Технология предприятия должна обеспечить качество изготавливаемого материала, поэтому необходимо было изучить размерный ряд заготовок на структуру и свойства, что и определило цель данного исследования.

Цель работы – изучение влияния степени деформации на формирование микроструктуры и механических свойств титанового сплава.

Методика и материалы

В статье изложены результаты исследования влияния степени деформации на процесс формирования структуры и механических свойств двухфазного титанового сплава 3М при ковке.

В качестве исходного материала был выбран слиток круглого сечения диаметром 450 мм, который затем подвергали операции протяжки с разной степенью деформации.

Перед деформацией заготовки нагревали в термической печи до температуры 1200°C. Время выдержки при данной температуре соответствовало времени достижению гомогенного раствора. Горячая пластическая деформация образцов осуществлялась в температурном интервале 1200–780°C.

Необходимо отметить, что процесс протяжки исходных заготовок проводили последовательно от максимального диаметра 450 мм до минимального 30 мм. В табл. 1 приведена технология обработки и режимы протяжки.

Таблица 1

Режим обработки образцов из титанового сплава 3М

Table 1

3M titanium alloy sample processing mode

№ п/п	Диаметр исходной заготовки	Диаметр после протяжки заготовки	Степень деформации ϵ	Температура нагрева °C	Время выдержки в печи	Окончательная ТО
п	мм	мм	%	°C	час	
1	450	350	22	1200	2,2	отжиг: температура нагрева 870°C, время выдержки 1,5 часа, охлаждение – воздух)
2	350	250	44	1200	1,75	
3	250	170	62	1200	1,15	
4	170	120	73	1100	1,0	
5	120	90	80	1100	0,9	
6	90	70	83	1100	0,45	
7	70	65	86	1100	0,35	
8	65	45	90	1100	0,325	
9	45	30	93	1100	0,225	

Распишем подробнее технологический процесс.

Заготовка диаметром 450 мм нагревалась в термической печи до температуры $T = 1200^\circ\text{C}$, время выдержки в печи 2,2 часа, осуществлялась протяжка на гидравлическом прессе на диаметр 350 мм.

Заготовка диаметром 350 мм нагревалась в термической печи до температуры $T = 1200^\circ\text{C}$, время выдержки в печи 1,75 часа, осуществлялась протяжка на гидравлическом прессе на диаметр 250 мм.

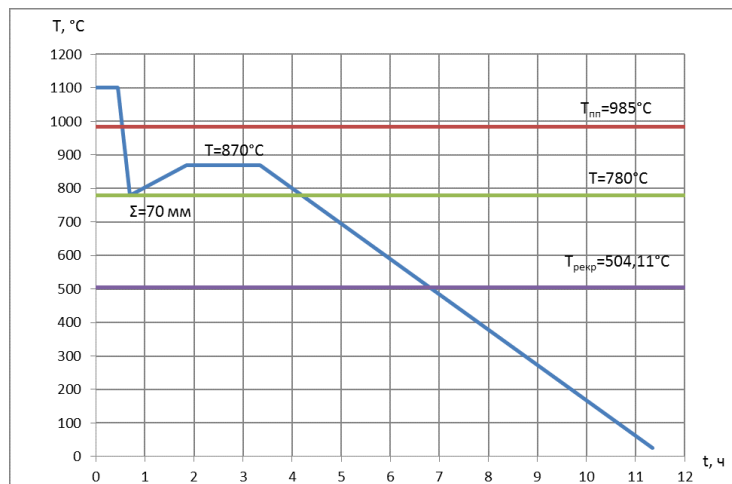


Рис. 2. Диаграмма окончательной термомеханической обработки образцов 1-5
 Fig. 2. Diagram of the final thermomechanical processing of samples 1-5

ТСКМ-300-13» по ГОСТ 9454-78, тип образцов I. Температура проведения испытания 20 С°. Так же проводились исследование химического состава образцов на рентгеновском приборе NitonXL и анализаторе газа EltraOH 900.

Результаты и обсуждения

В работе изучалось влияние степени горячей деформации на титановый сплав 3М различными методами. При изучении сплава были применены классические методы исследования сплава, широко применяемые на производстве, такие как определение химического состава на соответствие марки материала, механических свойств (испытания на ударную вязкость и на растяжение), а также исследование микроструктуры.

Таким образом, был (предложен) разработан комплексный подход изучения свойств титанового сплава 3М и выявлены зависимости влияния степени горячей деформации на микроструктуру и механические свойства титанового сплава 3М.

Верификация и валидация объекта исследования

Валидация объекта исследования достигается химическим анализом образцов и механическими свойствами.

Верификация подтверждается проведением опытов на сертифицированном оборудовании и повторяемостью испытаний, по результатам которых были посчитаны средние значения (представлены в таблицах).

Результаты химического состава образцов приведены в табл. 2.

Химический состав соответствует требованиям ОСТ1 92077-91.

Результаты механических свойств образцов представлены ниже в табл. 3, а также на рис. 3 для наглядности.

Полученные результаты механических свойств соответствуют требованиям ОСТ1 92062-90.

Таким образом, из результатов химического анализа и механических свойств, соответствующих нормативной документации, была подтверждена валидация исследуемого материала.

По результатам, указанных в табл. 3, были построены диаграммы зависимостей механических свойств образцов от разной степени горячей деформации (см. рис. 3)

На диаграммах видно, что с увеличением степени горячей деформации до 90% предел прочности (временное сопротивление) σ_B снижается на 9,1%, предел текучести $\sigma_{0,2}$ снижается на 9,5%

Таблица 2

**Химический состав образцов проката со степенью деформации
80%, 84%, 86%, 90%, 93%**

Table 2

**The chemical composition of rolled samples with a degree of deformation
of 80%, 84%, 86%, 90%, 93%**

Химический состав, массовая доля элементов, %												
Элементы/ степень деформации	Al	Si	Fe	O	H	N	C	Zr	Ni	Cu + Ni	V + Sn	Σприм.
ОСТ1 92077-91	3,5–5,0	0,12	0,25	0,15	0,006	0,04	0,10	0,30	< 0,08	< 0,10	< 0,15	< 0,30
93	4,45	0,08	0,10	0,04	0,0043	0,002	0,015	0,07	< 0,08	< 0,10	< 0,15	0,23
90	4,55	0,09	0,10	0,035	0,002	0,003	0,016	0,05	< 0,08	< 0,10	< 0,15	0,24
86	4,40	0,09	0,09	0,034	0,0017	0,005	0,015	0,07	< 0,08	< 0,10	< 0,15	0,21
83	4,45	0,08	0,10	0,037	0,001	0,005	0,016	0,07	< 0,08	< 0,10	< 0,15	0,23
80	4,50	0,09	0,09	0,04	0,0016	0,004	0,016	0,06	< 0,08	< 0,10	< 0,15	0,25

Таблица 3

**Механические свойства образцов со степенью деформацией
80%, 84%, 86%, 90%, 93%**

Table 3

**Mechanical properties of samples with a degree of deformation
of 80%, 84%, 86%, 90%, 93%**

Степень деформации, %	Времен. сопротивление σ_v , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относит. сужение, %	Относит. удлинение, %	Ударная вязкость
Требования ОСТ1 92062-90	540–755	> 490	> 30	> 12	> 70
80	660	570	41	17	122
83	660	570	41	19	122
86	645	560	35	24	123
90	600	510	23	35	128
93	720	600	25	45	78

и относительное сужение Ψ снижается на 41,9%. При дальнейшем увеличении степени горячей деформации происходит увеличение на 20% предела прочности σ_v , и на 28% предела текучести $\sigma_{0,2}$, и на 8,7% относительного сужения Ψ . При этом значения относительного удлинения δ повышается с увеличением степени горячей деформации на 165%. Ударная вязкость же с увеличением степени горячей деформации до 90% увеличилась на 4,9%, затем снизилась на 39,1% при дальнейшем увеличении степени горячей деформации.

Объяснить резкое снижения пластических свойств при степени деформации 90% можно с помощью микроструктуры исследуемого сплава (см. рис. 4). С увеличением степени деформации до 86% накапливаются дислокации, плотность дислокаций увеличивается. При дальнейшем

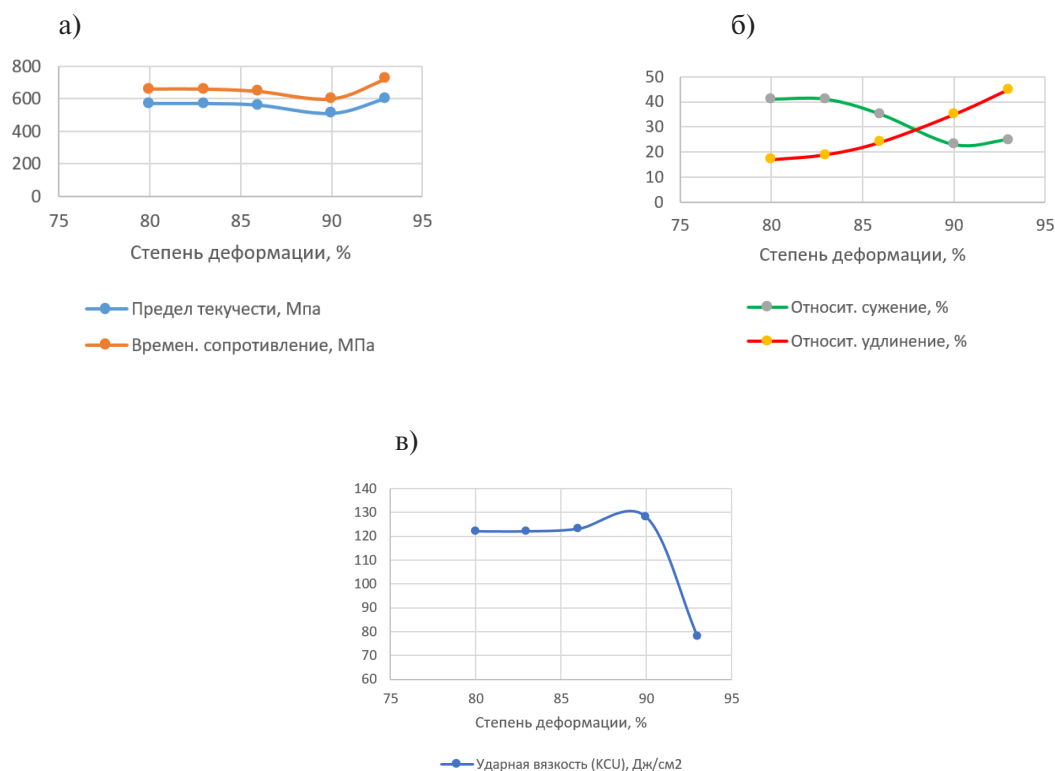


Рис. 3. Диаграммы механических свойств образцов со степенью деформацией 80%, 84%, 86%, 90%, 93%: а – предел прочности, временное сопротивление, б – относительное удлинение, относительное сужение, в – ударная вязкость

Fig. 3. Diagrams of the mechanical properties of samples with a degree of deformation of 80%, 84%, 86%, 90%, 93%: a – tensile strength, tensile strength, b – elongation, relative narrowing, c – impact strength

увеличении деформации до 90% происходит формирование субзёренных границ внутри зерна, то есть напряжение внутри зерна снижается, а, следовательно, снижается прочность (прочностные характеристики). Поскольку деформация продолжается, дислокации продолжают возникать, формируются окончательные границы субзёрен внутри зёрен. Структура измельчается, и, соответственно, прочность увеличивается, что соответствует известному закону Холла-Петча.

Таким образом из полученных результатов, видна закономерность: прочностные характеристики сплава улучшились (предел прочности σ_B увеличился на 10,9%, предела текучести $\sigma_{0,2}$ на 18,5%), то есть материал интенсивно упрочнялся. Характеристики пластичности оставаясь на достаточно высоком уровне (относительное сужение Ψ снизилось на 33,2%, относительного удлинения δ увеличилось на 165%, ударная вязкость снизилась на 34,2%).

Изменение механических свойств при степени горячей деформации 90% можно объяснить началом процесса рекристаллизации.

Из всего выше изложенного можно сделать выводы о закономерности влияния степени горячей деформации на механические свойства:

- (временное сопротивление) предел прочности σ_B с увеличением степени горячей деформации до 90% снижается на 9,1%, затем увеличивается на 20%;
- предел текучести $\sigma_{0,2}$ с увеличением степени горячей деформации до 90% снижается на 9,5%, затем увеличивается на 28%;
- относительное сужение Ψ с увеличением степени горячей деформации до 90% снижается на 41,9%, затем увеличивается на 8,7%;

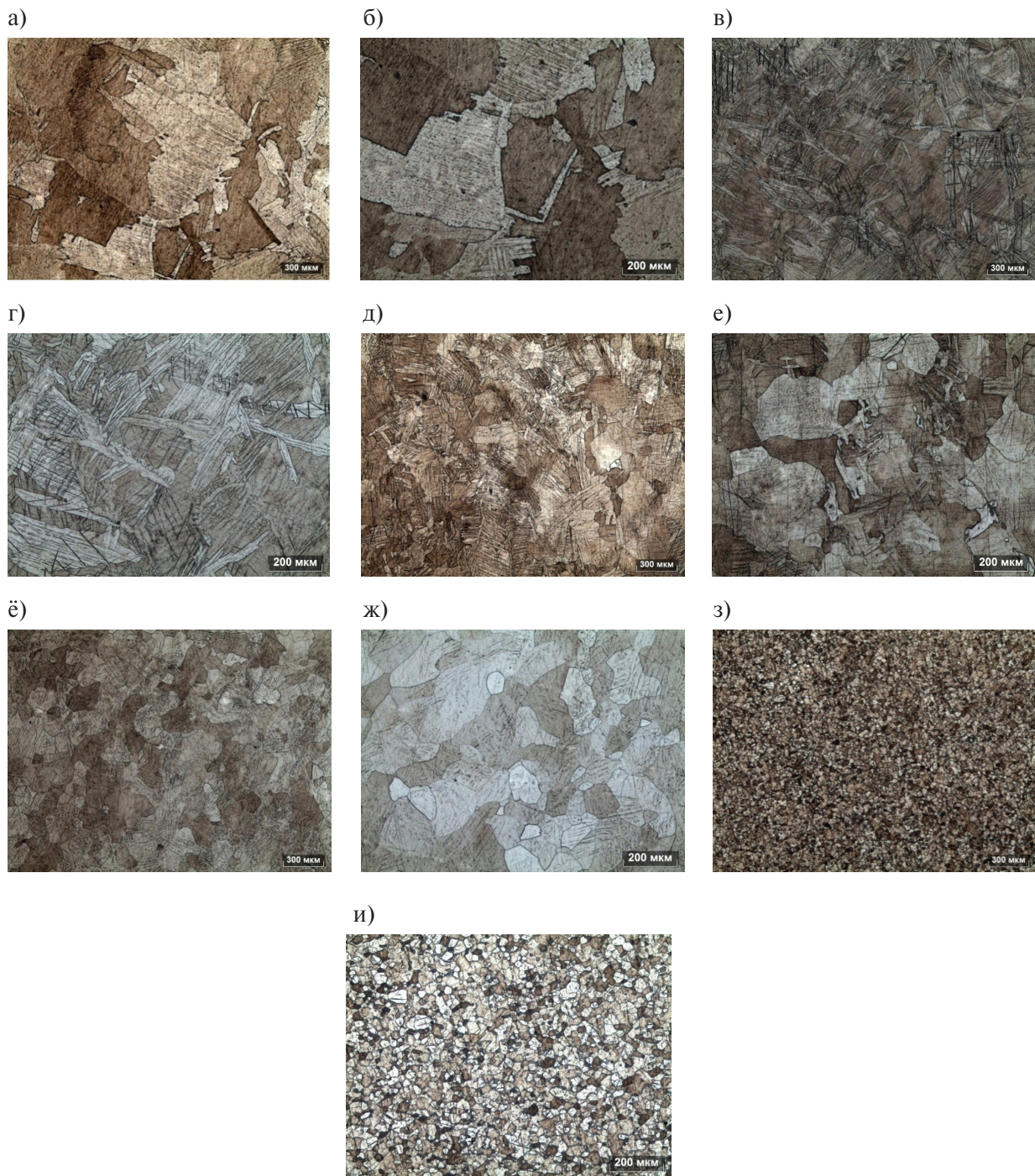


Рис. 4. Микроструктура образцов с деформациями 80%, а) x50, б) x100; 83%, в) x50, г) x100; 86% д) x50, е) x100; 90% ж) x50, з) x100; 93% и) x100

Fig. 4. Microstructure of specimens with 80% strains, а) x50, б) x100; 83%, в) x50, д) x100; 86% е) x50, ф) x100; 90% г) x50, г) x100; 93% и) x50, и) x100

– относительное удлинение δ повышается с увеличением степени горячей деформации (на 165%);

– ударная вязкость KCU с увеличением степени горячей деформации до 90% увеличилась на 4,9%, затем снизилась на 39,1% при дальнейшем увеличении степени горячей деформации.

Таким образом, с увеличением степени горячей деформации прочностные характеристики и пластические свойства в целом улучшаются.

Микроструктурный анализ образцов

Фотографии микроструктур образцов представлены на рис. 4.

Изучив микроструктуру образцов титанового сплава 3М, видим, что с увеличением степени горячей деформации структура металла становится более однородной. Микроструктура при деформации 80% имеет пластинчатое строение (колония чередующихся α - и β -фаз), а при деформации 93% уже имеет глобулярное строение, выраженное в основном α -фазой. Процесс рекристаллизации, превращение β -фазы в α -фазу, виден при деформации 90%.

Ниже в табл. 4 приведены результаты размера зерна.

Таблица 4

Размер зерна

Table 4

Grain size

Степень горячей деформации, %	Размер зерна
80	Более 600 мкм
83	400–490 мкм
86	Наряду с зёрнами размером 5 мкм присутствуют зёрна до 300
90	Наряду с зёрнами размером около 80 мкм присутствуют зёрна размером 300–400 мкм
93	около 20 мкм

По результатам исследования микроструктуры образцов титанового сплава 3М, можно сделать вывод о том, что с увеличением степени горячей деформации:

- размер зерна уменьшается с 600 до 20 мкм. Установлено, что для получения в структуре крупного зерна необходимая степень горячей деформации не должна превышать 90%, для получения мелкозернистой структуры степень горячей деформации должна превышать 93%, зона же деформации между 90% и 93% даёт частично рекристаллизованное состояние с крупными и мелкими зёрнами.

- строение при деформации 80% имеет пластинчатое строение (колония чередующихся α - и β -фаз), а при деформации 93% уже имеет глобулярное строение, выраженное в основном α -фазой;

- Выявлено, что динамическая рекристаллизация начинается при степени горячей деформации 90%, а полностью рекристаллизованная структура получается при степени горячей деформации 93%.

- Установлено, что при степени горячей деформации 93% формируется равноостная структура, таким образом, при степени деформации больше 93% будет формироваться лучшее состояние по анизотропии свойств.

Заключение

Валидация объекта исследования подтверждена результатами химического анализа образцов и механических свойств на соответствие НД (нормативной документации). Верификация достигнута проведением опытов на сертифицированном оборудовании и повторяемостью испытаний.

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы:

1. Установлены закономерности влияния степени горячей деформации на механические свойства:
 - (временное сопротивление) предел прочности σ_B с увеличением степени горячей деформации до 90% снижается на 9,1%, затем увеличивается на 20%
 - предел текучести $\sigma_{0,2}$ с увеличением степени горячей деформации до 90% снижается на 9,5%, затем увеличивается на 28%
 - относительное сужение Ψ с увеличением степени горячей деформации до 90% снижается на 41,9%, затем увеличивается на 8,7%
 - относительное удлинение δ повышается с увеличением степени горячей деформации (на 165%)
 - ударная вязкость КСУ с увеличением степени горячей деформации до 90% увеличилась на 4,9%, затем снизилась на 39,1% при дальнейшем увеличении степени горячей деформации.

Основываясь на полученных закономерностях о влиянии степени горячей деформации на механические свойства, можно сделать вывод о том, что с увеличением степени горячей деформации прочностные характеристики и пластические свойства в целом улучшаются.

2. Установлена закономерность влияние степени горячей деформации на структуру сплава 3М: с увеличением степени горячей деформации структура металла становится более однородной. Микроструктура при деформации 80% имеет пластинчатое строение (коллония чередующихся α - и β -фаз), а при деформации 93% уже имеет глобулярное строение, выраженное в основном α -фазой, также размер зерна уменьшается с 600 до 20 мкм. Процесс рекристаллизации, превращение β -фазы в α -фазу, виден при деформации 90%. Выявлено, что динамическая рекристаллизация начинается при степени горячей деформации 90%, а полностью рекристаллизованная структура получается при степени горячей деформации 93%. Установлено, что для получения в структуре крупного зерна необходимая степень горячей деформации не должна превышать 90%, для получения мелкозернистой структуры степень горячей деформации должна превышать 93%, зона же деформации между 90% и 93% даёт частично рекристаллизованное состояние с крупными и мелкими зёрнами. Установлено, что при степени горячей деформации 93% формируется равноосная структура, таким образом, при степени деформации больше 93% будет формироваться лучшее состояние по анизотропии свойств.

Таким образом, была установлена тройная взаимосвязь степени горячей деформации, структуры и свойств титанового сплава 3М. То есть была получена полная картина процесса для исследуемого материала. Опираясь на полученные результаты, можно говорить о том, что для получения определенных свойств и структуры, нужно использовать конкретную степень деформации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 2. Практические результаты на примере сплава ВТ6 // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2016. – № 3 (729). – С. 40–44. – EDN VSLMLL.

[2] **Мухаметрахимов М.Х.** Применение наноструктурных материалов из титанового сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности // Сб. *Кайбышевские чтения. Сборник докладов I межвузовской молодежной научной школы-конференции*. 2018. С. 109-114.

[3] Патент на полезную модель № 208810 U1 Российская Федерация, МПК В23К 26/00. Канал подачи сварочной проволоки из сплава Ti-Ni : № 2021101534 : заявл. 25.01.2021 : опубл. 14.01.2022 / А.И. Рудской, А.А. Попович, А.Р. Хисматуллин, Д.В. Курушкин; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает государственная корпорация по атомной энергии "Росатом". – EDN PTRROZ.

[4] Патент № 2562552 С1 Российская Федерация, МПК В22F 3/087, В22F 9/06, С22С 1/04. Способ получения электрода для производства порошковых жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана

тана : № 2014142605/02 : заявл. 23.10.2014 : опубл. 10.09.2015 / А.И. Рудской, А.А. Попович, Н.Г. Разумов [и др.]; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (ФГАОУ ВО "СПбПУ"). – EDN RZWWWN.

[5] **Федулов В.Н.** Режимы упрочнения высокопрочного ($\alpha + \beta$)-титанового сплава ВТ23 для применения в авиационной технике // *Литье и металлургия*. 2018. № 3 (92). С. 141–147.

[6] **Сенкевич К.С.** Перспективы получения и применения гибридных конструкций и композитов из титановых сплавов и нитинолаобзор // *Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2017. № 4. С. 71–78.

[7] **Zhou L.C., Li Y.H., He W.F., He G.Y., Nie X.F., Chen D.L., Lai Z.L., An Z.B.** Deforming TC6 titanium alloys at ultrahigh strain rates during multiple laser shock peening, *Materials Science & Engineering A*, (578) (2013) 181–186.

[8] **Shi R., Nie Z.H., Fan Q.B., Wang F.C., Zhou Y., Liu X.** Correlation between dislocation-density-based strain hardening and microstructural evolution in dual phase TC6 titanium alloy, *Materials Science & Engineering A*. 715 (2018) 101–107.

[9] **Филиппов А.А., Пачурин Г.В.** Применение высокочастотных установок при формировании структурно-механических свойств сортового проката // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2017. Т. 15. № 11. С. 509–514.

[10] **Калетина Ю.В., Грешнова Е.Д., Калетин А.Ю., Пилгогин В.П.** Влияние деформации на структуру и свойства сплава Гейслера Ni47Mn42In11 // *ВЕСТНИК ПНИПУ* 2018 Т. 20, № 2. С. 5–11.

[11] **Харитонов В.А., Усанов М.Ю.** Влияние кручения на степень сдвиговой деформации при различных способах волочения круглой проволоки // *Моделирование и развитие процессов ОМД*. 2018. № 25. С. 52–58.

[12] **Варгасов Н.Р., Радкевич М.М., Барахтин Б.К.** Особенности диссипации энергии при горячей пластической деформации псевдо- α титанового сплава // *Современное машиностроение. Наука и образование*. – 2017. – № 6. – С. 613–624. – DOI: 10.1872/MMF-2017-54. – EDN YSZWJB.

[13] **Kuznetsov P.A., Karachevtsev I.D., Prostorova A.O. [et al.]**. The elastostatic pressing and rotary forging of high-density sintered products technology // *Advances in Mechanical Engineering*, Saint Petersburg, Russia, 01 июня 2021 года. – Cham: Springer, 2022. – Pp. 159–166. – DOI: 10.1007/978-3-030-91553-7_17. – EDN VRRYZA.

[14] **Стрельникова А.А.** Исследование влияния высокотемпературной деформации на свойства α - и β -фаз титанового сплава / А.А. Стрельникова, М.А. Скотникова // *Материаловедение. Энергетика*. – 2021. – Т. 27. – № 3. – С. 134–144. – DOI: 10.18721/JEST.27312. – EDN ZXHHXN.

[15] **Рудской А.И., Колбасников Н.Г.** Управление структурой и свойствами сталей при горячей деформации // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2012. – № 10. – С. 22–30. – EDN PFKDFV.

[16] **Кондратьева О.В.** Исследование режимов упрочняющей термической обработки титанового сплава ВТ23 / О.В. Кондратьева, С.Ю. Кондратьев, О.В. Швецов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2018. – № 11 (761). – С. 28–35. – EDN YQHQP.

[17] **Skotnikova M.A., Ivanova G.V., Strelnikova A.A.** Macromechanism destruction of structurally and crystallographically textured titanium billets // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019): Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Sochi, 25–29 марта 2019 года. – Cham: Springer International Publishing, 2020. – Pp. 1097–1105. – DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_115. – EDN ZLSIDS.

[18] **Skotnikova M.A., Strelnikova A.A., Ivanova G.V. [et al.]**. Localization of Plastic Deformation in Austenitic Steel at Low-Temperature Cycling Loading // *Advances in Mechanical Engineering : Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME)*, Saint Petersburg, Russia, 01–02 июня 2019 года. – Cham: Springer, 2020. – Pp. 175–182. – DOI: 10.1007/978-3-030-39500-1_18. – EDN UBMXMJ.

[19] Рудской А.И., Коджаспиров Г.Е., Батасов А.В. Исследование эволюции микроструктуры жаропрочного сплава системы Ni-Cr-Co-Nb-Ta-Mo при горячей пластической деформации с использованием физического моделирования // Деформация и разрушение материалов. – 2019. – № 9. – С. 20–24. – DOI: 10.31044/1814-4632-2019-9-20-24. – EDN ITСЕНQ.

[20] Kondrat'ev S.Y., Sokolov Y.A. New Approach to Electron Beam Synthesis of Powder and Composite Materials. Part 2. Practical Results for Alloy VT6 // Metal Science and Heat Treatment. – 2016. – Vol. 58. – No. 3-4. – Pp. 165–169. – DOI: 10.1007/s11041-016-9982-y. – EDN XMMERI.

[21] Швецов О.В., Кондратьев С.Ю. Влияние режимов закалки и старения на эксплуатационные свойства сплава VT23 // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24. – № 2. – С. 119–133. – DOI: 10.18721/JEST.240210. – EDN UYIDRM.

[22] Хрусталева И.Н., Любомудров С.А., Ларионова Т.А., Толстолес А.А. Повышение эффективности технологической подготовки производства на судоремонтных предприятиях // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2019. – Т. 25. – № 3. – С. 86–96. DOI: 10.18721/JEST.25306. – EDN YPKVMS.

[23] Тамаркин М.А., Шведова А.С., Тищенко Э.Э. Методика проектирования технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования // Вестник машиностроения. 2018. № 4. С. 78–83.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

СТРЕЛЬНИКОВА АНГЕЛИНА АНАТОЛЬЕВНА – *ведущий инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*
E-mail: strelnikova.angelina@bk.ru

REFERENCES

[1] S.Yu. Kondratyev, Yu.A. Sokolov, Novyy podkhod k sintezu poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov elektronnykh luchom. Chast 2. Prakticheskiye rezultaty na primere splava VT6 // Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov. – 2016. – № 3 (729). – S. 40–44. – EDN VSLMLL.

[2] M.Kh. Mukhametrakhimov, Primeneniye nanostrukturnykh materialov iz titanovogo splava VT6 v usloviyakh nizkotemperaturnoy sverkhplastichnosti // Sb. Kaybyshevskiyechteniya. Sbornik dokladov I mezhvuzovskoy molodezhnoy nauchnoy shkoly-konferentsii. 2018. S. 109–114.

[3] Patent na poleznuyu model № 208810 U1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B23K 26/00. Kanal podachi svarochnoy provoloki iz splava Ti-Ni : № 2021101534 : zayavl. 25.01.2021 : opubl. 14.01.2022 / A.I. Rudskoy, A.A. Popovich, A.R. Khismatullin, D.V. Kurushkin ; zayavitel Rossiyskaya Federatsiya, ot imeni kotoroy vystupayet gosudarstvennaya korporatsiya po atomnoy energii "Rosatom". – EDN PTRROZ.

[4] Patent № 2562552 C1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B22F 3/087, B22F 9/06, C22C 1/04. Sposob polucheniya elektroda dlya proizvodstva poroshkovykh zharoprochnykh splavov na osnove alyuminida titana: № 2014142605/02 : zayavl. 23.10.2014 : opubl. 10.09.2015 / A.I. Rudskoy, A.A. Popovich, N.G. Razumov [i dr.]; zayavitel federalnoye gosudarstvennoye avtonomnoye obrazovatelnoye uchrezhdeniye vysshego obrazovaniya "Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskii universitet Petra Velikogo" (FGAOU VO "SPbPU"). – EDN RZWWWN.

[5] V.N. Fedulov, Rezhimy uprochneniya vysokoprochnogo ($\alpha + \beta$)-titanovogo splava VT23 dlya primeneniya v aviatsionnoy tekhnike // Liteye i metallurgiya. 2018. № 3 (92). S. 141–147.

[6] **K.S. Senkevich**, Perspektivy polucheniya i primeneniya gibridnykh konstruktsiy i kompozitov iz titanovykh splavov i nitinolaobzor // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnyye pokrytiya. 2017. № 4. S. 71–78.

[7] **L.C. Zhou, Y.H. Li, W.F. He, G.Y. He, X.F. Nie, D.L. Chen, Z.L. Lai, Z.B. An**, Deforming TC6 titanium alloys at ultrahigh strain rates during multiple laser shock peening, *Materials Science & Engineering A*, (578) (2013) 181–186.

[8] **R. Shi, Z.H. Nie, Q.B. Fan, F.C. Wang, Y. Zhou, X. Liu**, Correlation between dislocation-density-based strain hardening and microstructural evolution in dual phase TC6 titanium alloy, *Materials Science & Engineering A*. 715 (2018) 101–107.

[9] **A.A. Filippov, G.V. Pachurin**, Primeneniye vysokochastotnykh ustanovok pri formirovaniy strukturno-mekhanicheskikh svoystv sortovogo prokata // Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyeni. 2017. T. 15. № 11. S. 509–514.

[10] **Yu.V. Kaletina, Ye.D. Greshnova, A.Yu. Kaletin, V.P. Pilyugin**, Vliyaniye deformatsii na strukturu i svoystva splava Geyslera Ni47Mn42In11 // VESTNIK PNIPU 2018 T. 20, № 2. S. 5–11.

[11] **V.A. Kharitonov, M.Yu. Usanov**, Vliyaniye krucheniya na stepen sdvigovoy deformatsii pri razlichnykh sposobakh volocheniya krugloy provoloki // Modelirovaniye i razvitiye protsessov OMD. 2018. № 25. S. 52–58.

[12] **N.R. Vargasov, M.M. Radkevich, B.K. Barakhtin**, Osobennosti dissipatsii energii pri goryachey plasticheskoy deformatsii psevdo- α titanovogo splava // Sovremennoye mashinostroyeniye. Nauka i obrazovaniye. – 2017. – № 6. – S. 613–624. – DOI: 10.1872/MMF-2017-54. – EDN YSZWJB.

[13] **P.A. Kuznetsov, I.D. Karachevtsev, A.O. Prostorova [et al.]**, The Elastostatic Pressing and Rotary Forging of High-Density Sintered Products Technology // *Advances in Mechanical Engineering*, Saint Petersburg, Russia, 01 iyunya 2021 goda. – Cham: Springer, 2022. – Pp. 159–166. – DOI: 10.1007/978-3-030-91553-7_17. – EDN VRRYZA.

[14] **A.A. Strelnikova**, Issledovaniye vliyaniya vysokotemperaturnoy deformatsii na svoystva α - i β -faz titanovogo splava / A.A. Strelnikova, M.A. Skotnikova // *Materialovedeniye. Energetika*. – 2021. – T. 27. – № 3. – S. 134–144. – DOI: 10.18721/JEST.27312. – EDN ZXHHXN.

[15] **A.I. Rudskoy, N.G. Kolbasnikov**, Upravleniye strukturoy i svoystvami staley pri goryachey deformatsii // Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyeni. – 2012. – № 10. – S. 22–30. – EDN PFKDFV.

[16] **O.V. Kondratyeva**, Issledovaniye rezhimov uprochnyayushchey termicheskoy obrabotki titanovogo splava VT23 / O.V. Kondratyeva, S.Yu. Kondratyev, O.V. Shvetsov // *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. – 2018. – № 11 (761). – S. 28–35. – EDN YQHQPAP.

[17] **M.A. Skotnikova, G.V. Ivanova, A.A. Strelnikova**, Macromechanism Destruction of Structurally and Crystallographically Textured Titanium Billets // *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019): Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Sochi, 25–29 marta 2019 goda. – Cham: Springer International Publishing, 2020. – Pp. 1097–1105. – DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9_115. – EDN ZLSIDS.

[18] **M.A. Skotnikova, A.A. Strelnikova, G.V. Ivanova [et al.]**, Localization of Plastic Deformation in Austenitic Steel at Low-Temperature Cycling Loading // *Advances in Mechanical Engineering : Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME)*, Saint Petersburg, Russia, 01–02 iyunya 2019 goda. – Cham: Springer, 2020. – Pp. 175–182. – DOI: 10.1007/978-3-030-39500-1_18. – EDN UBMXMJ.

[19] **A.I. Rudskoy, G.Ye. Kodzhaspirov, A.V. Batasov**, Issledovaniye evolyutsii mikrostruktury zharoprochnogo splava sistemy Ni-Cr-Co-Nb-Ta-Mo pri goryachey plasticheskoy deformatsii s ispolzovaniyem fizicheskogo modelirovaniya // *Deformatsiya i razrusheniye materialov*. – 2019. – № 9. – S. 20–24. – DOI: 10.31044/1814-4632-2019-9-20-24. – EDN ITCEHQ.

[20] **S.Y. Kondrat'ev, Y.A. Sokolov**, New Approach to Electron Beam Synthesis of Powder and Composite Materials. Part 2. Practical Results for Alloy VT6 // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2016. – Vol. 58. – No. 3-4. – Pp. 165–169. – DOI: 10.1007/s11041-016-9982-y. – EDN XMMERI.

[21] **O.V. Shvetsov, S.Yu. Kondratyev**, Vliyaniye rezhimov zakalki i stareniya na ekspluatatsionnyye svoystva splava VT23 // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. – 2018. – T. 24. – № 2. – S. 119–133. – DOI: 10.18721/JEST.240210. – EDN UYIDRM.

[22] **I.N. Khrustaleva, S.A. Lyubomudrov, T.A. Larionova, A.A. Tolstoles**, Povysheniye effektivnosti tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva na sudoremontnykh predpriyatiyakh // Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbPU. Yestestvennyye i inzhenernyye nauki. – 2019. – T. 25. – № 3. – S. 86–96. – DOI: 10.18721/JEST.25306. – EDN YPKVMS.

[23] **M.A. Tamarkin, A.S. Shvedova, E.E. Tishchenko**, Metodika proyektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov obrabotki detaley dinamicheskimi metodami poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya // Vestnik mashinostroyeniya. 2018. № 4. S. 78–83.

INFORMATION ABOUT AUTHOR

Angelina A. STRELNIKOVA – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: strelnikova.angelina@bk.ru

Поступила: 06.06.2022; Одобрена: 14.06.2022; Принята: 14.06.2022.
Submitted: 06.06.2022; Approved: 14.06.2022; Accepted: 14.06.2022.