

DOI: 10.18721/JEST.27312

УДК 669

*А.А. Стрельникова, М.А. Скотникова*

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА СВОЙСТВА $\alpha$ - И $\beta$ -ФАЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА**

В статье исследовано влияние высокотемпературной деформации на фазовый состав и физико-механические свойства титанового сплава. В данной статье приведены результаты исследования двухфазного титанового сплава 3М при различных степенях высокотемпературной деформации (80%, 83%, 86%, 90%, 93%). В статье проведены фазовые исследования, применены методы оптической металлографии и инструментального индентирования. Установлены взаимосвязи между структурно-фазовым состоянием, физико-механическими свойствами титанового сплава 3М при изменении степени деформации: с увеличением степени деформации титанового сплава содержание  $\alpha$ -фазы возрастает в фазовом составе материала, увеличивается твердость и эластичность сплава, а пластичность снижается. Полученные результаты позволяют существенно углубить знания о связи фазового состояния и физико-механических титанового сплава.

*Ключевые слова:* титановый сплав, высокотемпературная деформация, механические свойства, фазовый состав, оптическая микроскопия, инструментальное индентирование.

*Ссылка при цитировании:*

Стрельникова А.А., Скотникова М.А. Исследование влияния высокотемпературной деформации на свойства  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз титанового сплава // *Материаловедение. Энергетика.* 2021. Т. 27, № 3. С. 134–144. DOI: 10.18721/JEST.27312

Эта статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*A.A. Strelnikova, M.A. Skotnikova*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russia

## **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HIGH-TEMPERATURE DEFORMATION ON THE PROPERTIES OF THE $\alpha$ - AND $\beta$ -PHASES OF TITANIUM ALLOY**

The article studies the influence of the high-temperature deformation on phase composition and physico-mechanical properties of the titanium alloy. Research into the topic allows increasing durability, reliability, and the resource of machines and equipment. Materials and designs of machines and equipment are constantly getting upgraded in the world, therefore, it is very important not only to use already known methods of materials research, but also to develop and improve research methods and techniques. In this scientific project, a two-phase titanium alloy 3M was investigated at different degrees of high-temperature deformation (80%, 83%, 86%, 90%, 93%). The authors carried out phase studies using the methods of optical metallography and instrumental indentation. The relationships between the structural-phase state, physical and mechanical properties of titanium alloy 3M with a change in the degree of deformation have been established. The study of the phase composition, properties of the  $\alpha$ - and  $\beta$ -phase by the method of indentation of samples with different degrees of hot deformation of the 3M alloy made it clear that

with an increase in the degree of deformation, the fraction of the  $\alpha$ -phase in the alloy increases, and the material becomes harder and less plastic.

*Keywords:* titanium alloy, high-temperature deformation, mechanical properties, phase composition, optical microscopy, instrumental indentation.

*Citation:*

A.A. Strelnikova, M.A. Skotnikova, Investigation of the effect of high-temperature deformation on the properties of the  $\alpha$ - and  $\beta$ -phases of titanium alloy, *Materials Science. Power Engineering*, 27 (03) (2021) 134–144, DOI: 10.18721/JEST.27312

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

**Введение.** Титановые сплавы являются перспективными материалами, применение которых в промышленности, строительстве постоянно возрастает [1–5].

Много работ посвящено изучению влияния различных видов обработок на механические свойства и структуру титановых сплавов [6–8], в том числе влияние степени деформации на материал [9–12].

В настоящее время основными методами исследования материала являются микроструктурный, рентгенографический анализы, методы испытания на ударный изгиб и методы статистических испытаний на растяжение [13–16]. В последние годы кроме часто используемых методов стали применять метод инструментального индентирования [17–19]. Данный метод исследования позволяет определить физико-механические свойства сплава (инструментальную твердость, работу пластической деформации и работу упругого восстановления, и другие свойства материала) локально и наиболее точно.

Цель работы – исследование влияния высокотемпературной деформации на свойства фаз титанового сплава методом инструментального индентирования.

### Методика и материалы

Исследования проводились на образцах титанового сплава 3М с разной степенью деформации 80%, 83%, 86%, 90%, 93%, полученных в результате высокотемпературной обработки давлением – ковкой. Образцы находятся в отожженном состоянии (температура нагрева – 870°C; время выдержки – 1 ч 30 мин; охлаждение – воздух).

Исследование фазового состава структуры титанового сплава 3М проводилось на 5 образцах с разной степенью деформацией 80%, 83%, 86%, 90%, 93% методом оптической микроскопии на приборе NIKON ECLIPSE MA100N.

Исследование влияния степени деформации на физикомеханические свойства (твердость, эластичность и пластичность материала)  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз титанового сплава проводилось методом инструментального индентирования. Исследования проводились на приборе Micro Indentation Tester CSM.

Инструментальное индентирование проводили при непрерывном внедрении индентора алмазной пирамиды Виккерса в  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазы образцов исследуемого сплава при постоянной нагрузке ( $F$ ) 50 мН. Время нагружения 30 сек, а затем алмазную пирамиду Виккерса отводили до полной потери контакта с образцом. Во время всего испытания в виде диаграмм регистрировались значения нагрузки ( $F$ ) и глубины погружения ( $h$ ) индентора (рис.1, а).

Непрерывное измерение значений глубины внедрения индентора от перемещения этого индентора при нагружении и снятии нагрузки позволяет определить следующие свойства сплава: значения инструментальной твердости ( $H_{IT}$ ), глубины погружения индентора ( $h$ ), работы пластической деформации  $W_{\text{plast}}$ , работа упругой деформации  $W_{\text{elast}}$ , механической работы  $W_{\text{total}}$  при индентировании.

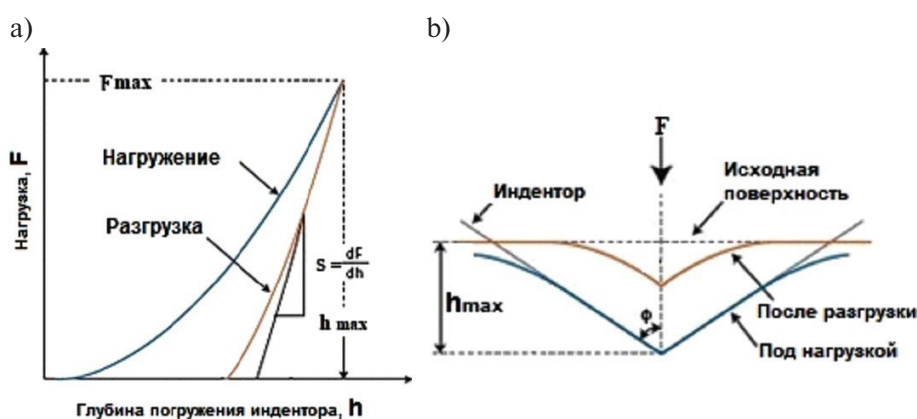


Рис. 1. а – Диаграмма индентирования – зависимость нагрузки от глубины внедрение, б – Схема продольного сечения зоны индентирования  
 Fig. 1. а – Indentation diagram – dependence of the load on the penetration depth, б – Diagram of the longitudinal section of the indentation zone

При снятии приложенной нагрузки (остановке инструмента) часть работы упругой деформации исчезает, что сопровождается выделением энергии и восстановлением микрорельефа поверхности (рис. 1, б) [20]<sup>1</sup>.

**Результаты исследования и их обсуждения**

Титановый сплав 3М является двухфазным сплавом. А так как работа посвящена изучению влияния степени деформации на механические свойства α- и β- фаз, то для начала необходимо определить *фазовый состав* сплава при разных степенях деформации.

Для этого было посчитано процентное соотношение α- и β- фаз в структуре каждого образца. Результаты приведены в табл. 1 и представлены на рис. 2.

Таблица 1

**Процент β-фазы, занимаемой от всей площади шлифа**

Table 1

**The percentage of the β-phase occupied from the total area of the microsection**

Образец со степенью предварительной деформации, %	80	83	86	90	93
Процент β-фазы, занимаемой от всей площади шлифа, %	34,52	32,71	30,77	20,05	6,99

Из представленных в табл. 1 результатов, видно, что фазовый состав образцов имеет в своей структуре α- и β-фазы, причём процент β-фазы во много раз меньше α-фазы, и с увеличением степени деформации количество β-фазы уменьшается.

Далее исследовалось влияние степени деформации на физикомеханические свойства (твёрдость и пластичность материала) при *инструментальном индентировании*.

Результатами измерений при индентировании всех характеристик для каждой фазы и каждой степени деформации являются диаграммы зависимости нагрузки  $F_n$  (Н) от времени t (с) и диаграммы зависимости глубины индентирования h (мкм) от времени t (с). Также на основании полученных диаграмм можно построить общую диаграмму зависимости нагрузки  $F_n$  от глубины индентирования h.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 8.748-2011 Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании

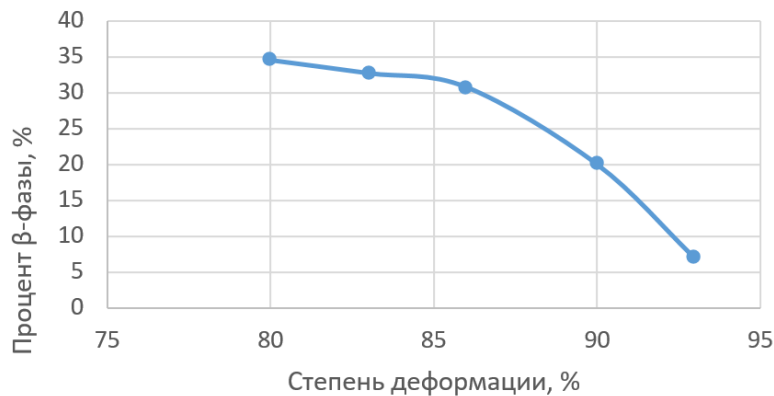


Рис. 2. Диаграмма зависимости процента  $\beta$ -фазы, занимаемой от всей площади шлифа, от степени деформации

Fig. 2. Diagram of the dependence of the percentage of  $\beta$ -phase occupied by the entire area of the microsection on the degree of deformation

Графики результатов, обработанные и приведенные к среднему значению, представлены на диаграммах зависимостей нагрузки  $F_n$  от глубины индентирования  $h$  для каждой степени деформации (см. рис. 3, а–д) и для каждой фазы (см. рис. 3, е–ж).

Из приведенных графиков можно получить всю информацию о свойствах материала. Рассмотрим влияние степени деформации на твердость, пластичность и эластичность материала.

По глубине внедрения  $h_{\max}$  можно судить о твердости материала: чем меньше глубина внедрения, тем больше сопротивление материала, соответственно, больше твердость. Из рис. 3, а–д видим, что глубина внедрения  $\alpha$ - фазы меньше глубины внедрения  $\beta$ -фазы при всех степенях деформации. При этом глубина внедрения уменьшается при степени деформации от 80% до 86%, затем увеличивается до степени деформации 90% и снова уменьшается (см. рис. 3, е–ж). Диаграммы глубины индентирования приведены на рис. 4, а. Разница глубин внедрения между фазами  $\alpha$  и  $\beta$  больше всего отличается при степени деформации 86% и 93%, следовательно, и твердость больше всего отличается между фазами при этих степенях деформации, что подтверждается диаграммами зависимости твердости инструментальной НИТ, МПа от степени деформации  $\epsilon$ , % (см. рис 4, б). Исходя из результатов по глубине внедрения, мы можем сказать, что твердость самая высокая для  $\alpha$ - фазы при степени деформации 86%, для  $\beta$ - фазы – 83%, а низкая твердость при степени деформации 80% для обеих фаз.

Далее рассмотрим влияние степени деформации на пластичность материала. Остаточная глубина отпечатка после снятия нагрузки  $h_p$  говорит о пластичности поверхности материала: чем меньше  $h_p$ , тем больше восстанавливается материал после снятия приложенной нагрузки, и тем материал менее пластичный и более эластичный.

Из рис. 3, а–д видим, что глубина отпечатка после снятия нагрузки  $h_p$   $\alpha$ -фазы меньше глубины отпечатка после снятия нагрузки  $\beta$ -фазы при всех степенях деформации сплава. То есть  $\alpha$ -фаза менее пластичная, чем  $\beta$ -фаза при каждой степени деформации. Если сравнивать между собой глубины отпечатка после снятия нагрузки степеней деформации для  $\beta$ -фазы, то видим, что глубина отпечатка после снятия нагрузки уменьшается при степени деформации от 80% до 86%, затем увеличивается (см. рис. 3, ж). Для  $\alpha$ -фазы глубина отпечатка после снятия нагрузки возрастает при степени деформации от 80% до 83%, затем снижается до степени деформации до 86%, после возрастает до 90%, и затем снижается (3, е). Таким образом, для  $\beta$ -фазы более пластичной является степень деформации 93% и менее – 86%, а для  $\alpha$ -фазы более пластичной является степень деформации 90% и менее – 86%.

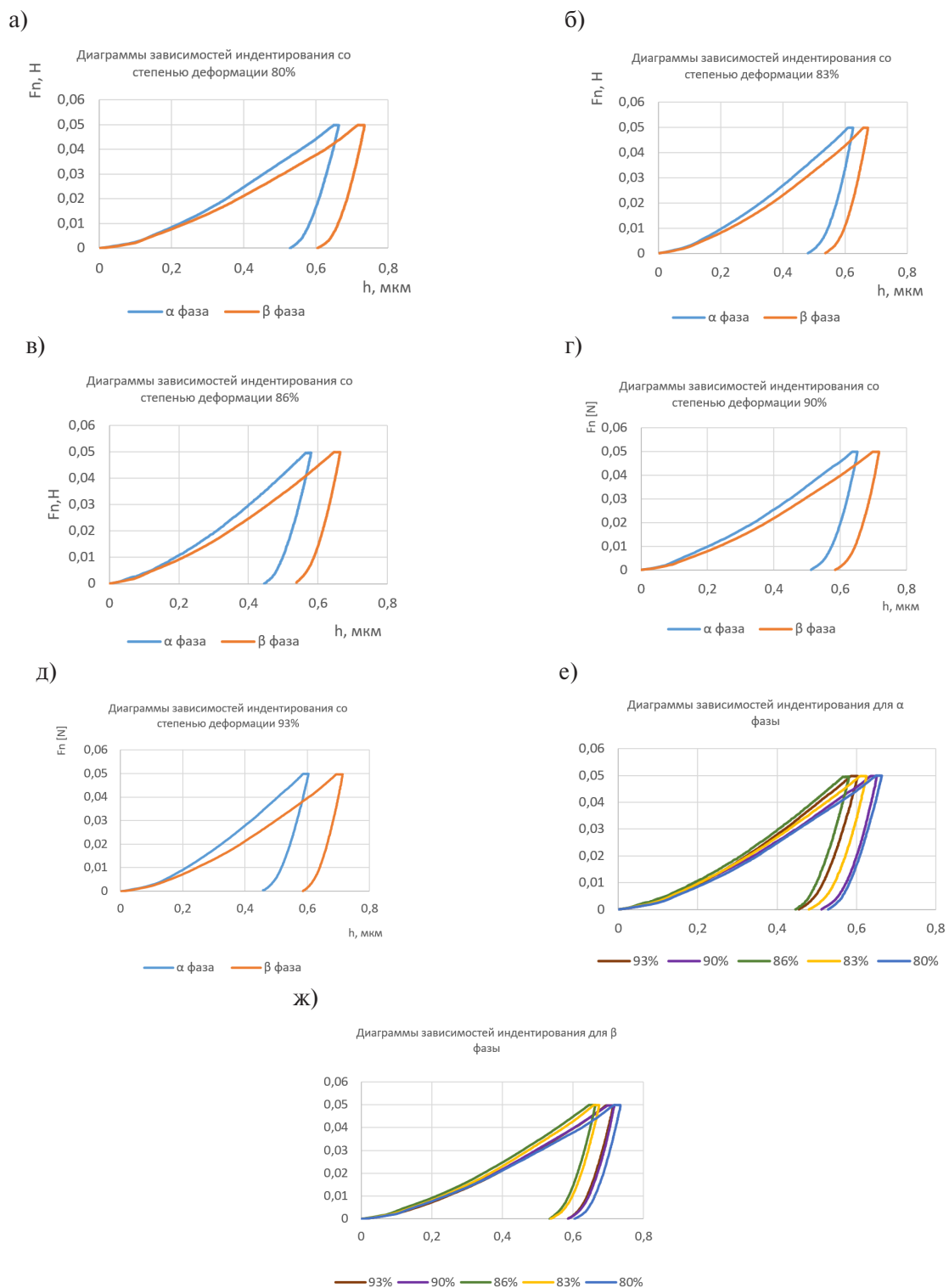


Рис. 3. Диаграмма зависимостей нагрузки  $F_n$  от глубины индентирования: а – для степени деформации 80%, б – для степени деформации 83%, в – для степени деформации 86%, г – для степени деформации 90%, д – для степени деформации 93%, е – для каждой степени деформации для  $\alpha$ -фазы, ж – для каждой степени деформации для  $\beta$ -фазы.

Fig. 3. Diagram of dependences of the load  $F_n$  on the indentation depth: а – for the degree of deformation of 80%, б – for the degree of deformation of 83%, в – for the degree of preliminary deformation of 86%, г – for the degree of preliminary deformation of 90%, д – for the degree of preliminary deformation of 93%, е – for the degree deformation 93%, ж – for each degree of deformation for the  $\alpha$ -phase, г – for each degree of deformation for the  $\beta$ -phase

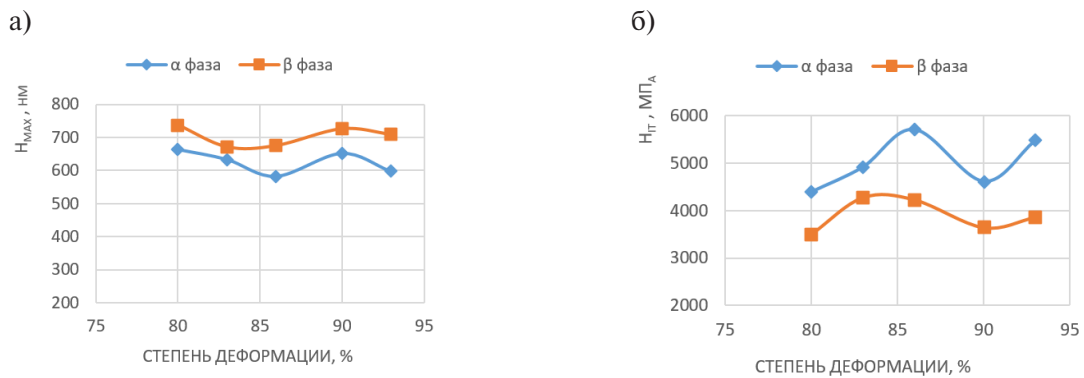


Рис. 4. Диаграмма зависимостей: а – Максимальной глубины индентирования от степени деформации, б – Твердости индентирования от степени деформации

Fig. 4. Diagram of dependences: a – Maximum indentation depth on the degree of deformation, b – Hardness of indentation on the degree of deformation

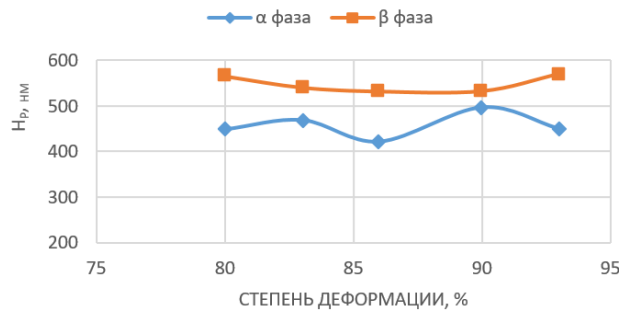


Рис. 5. Диаграмма зависимости остаточной глубины отпечатка после снятия нагрузки  $h_p$  от степени деформации  
Fig. 5. Diagram of the dependence of the residual indentation depth after unloading  $h_p$  on the degree of deformation

Далее рассмотрим влияние высокотемпературной деформации на следующие характеристики: работу упругой деформации, работу пластической (продольной) деформации и полную механическую работу.

Особенности упругопластической деформации приповерхностных объемов материалов заготовок при вдавливании индентором и её локализации в области фактического контакта с поверхностью индентора изучены еще недостаточно.

Ниже на рис. 6, а–в приведены результаты влияния высокотемпературной деформации на работы упругой и пластической деформаций, а также полной механической работы деформации титанового сплава 3М.

Из представленных результатов на рис. 6, а–в видно, что часть механической работы  $W_{total}$ , растрчивается на пластическую деформацию  $W_{plast}$ . При снятии приложенной нагрузки часть работы (работа упругой деформации  $W_{elast}$ ) освобождается. Из приведенных выше диаграмм видно, что больше энергии идёт на работу пластической деформации для каждой степени деформации для обеих фаз.

Анализируя диаграммы зависимости работы пластической деформации от степени деформации (рис. 6, а), можно сказать, что  $\alpha$ -фаза менее пластичная, чем  $\beta$ -фаза. Далее сравним работу пластической деформации между собой для каждой степени деформации. Для  $\alpha$ -фазы работа пластической деформации уменьшается от 80% степени предварительной деформации до 86%, затем увеличивается до 90%, после уменьшается (см. рис. 3, е). Для  $\beta$ -фазы работа пластической

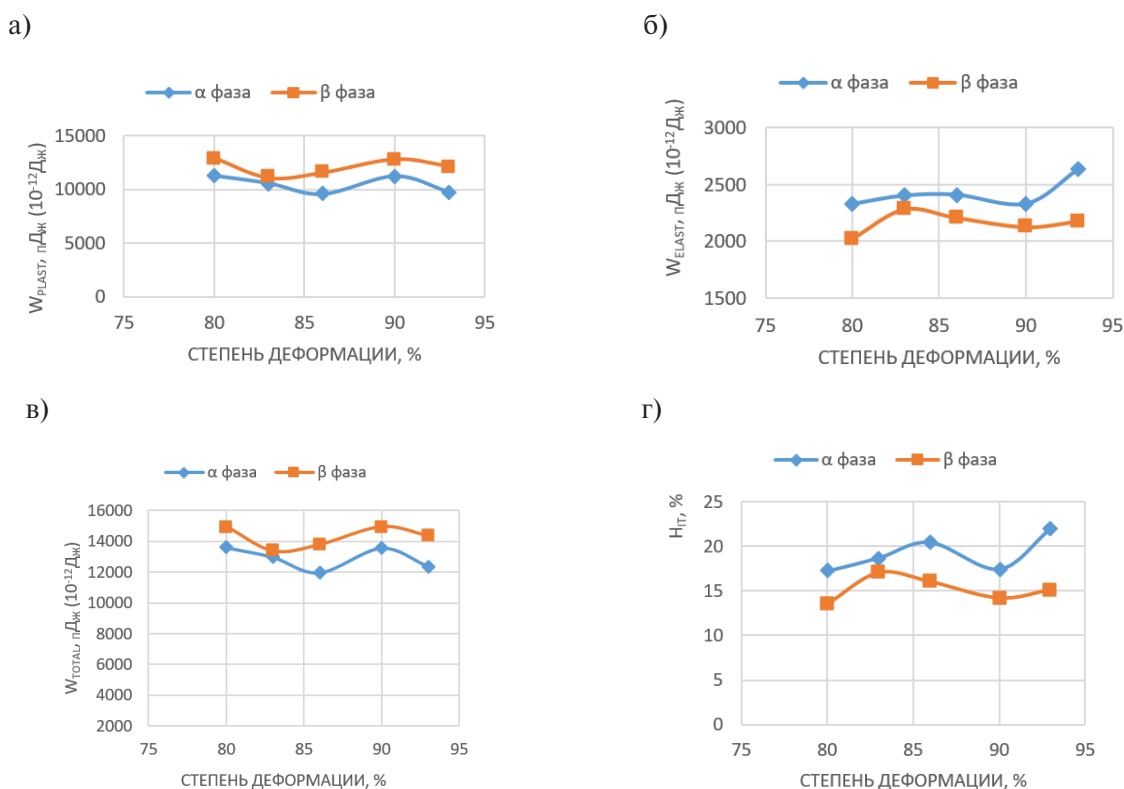


Рис. 6. Диаграммы: а – Работа пластической деформации, б – Работа упругой деформации, в – Полная механическая работа, г – Упругая составляющая работы

Fig. 6. Diagrams: a – Work of plastic deformation, б – Work of elastic deformation, в – Full mechanical work, г – Elastic component of work

деформации снижается от 80% степени деформации до 83%, затем возрастает до 90%, и снижается (з, ж). При этом следует отметить, что максимальная работа пластической деформации совершается при 80% степени деформации для  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз, а минимальная при 86% для  $\alpha$ - фазы и 83% для  $\beta$ - фазы. Это говорит о том, что материал наиболее пластичен при степени деформации 80% (то есть минимальной степени деформации) для обеих фаз.

Далее рассмотрим влияние высокотемпературной деформации на эластичность материала. Показателем эластичности материала является упругая составляющая работы  $\eta_{ГТ}$ , % (см. рис. 6, г): чем больше  $\eta_{ГТ}$ , тем материал более эластичный (менее пластичный).

Анализируя диаграммы зависимости упругой составляющей работы деформации  $\eta_{ГТ}$  от степени предварительной деформации (рис. 6, г), можно сказать, что  $\eta_{ГТ}$  при вдавливании индентора в  $\alpha$ - фазе больше, чем в  $\beta$ - фазе, и что с увеличением степени деформации упругая составляющая работы деформации при вдавливании в  $\alpha$ - и  $\beta$ - фазах растет, но изменения  $\eta_{ГТ}$  в  $\alpha$ - фазах более заметно. При этом следует отметить, что минимальная упругая составляющая работы деформации  $\eta_{ГТ}$  совершается при 80% степени предварительной деформации для  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз. Следовательно, материал менее эластичный для обеих фаз при наименьшей степени деформации.

### Заключение

Фазовый состав титанового сплава изменяется под влиянием высокотемпературной деформации: с увеличением степени деформации процентное содержание  $\alpha$ - фазы возрастает, а  $\beta$ - фазы снижается.

Исследование влияния высокотемпературной деформации на свойства фаз титанового сплава 3М показало следующее:

1)  $\alpha$ - фаза более твердая, чем  $\beta$ - фаза. Твёрдость самая высокая для  $\alpha$ - фазы при степени деформации 86%, для  $\beta$ - фазы – 83%, а низкая твёрдость при степени деформации 80% для обеих фаз. В целом, твердость сплава с увеличением степени деформации улучшается.

2)  $\alpha$ - фаза менее пластичная, чем  $\beta$ - фаза. Максимальная работа пластической деформации совершается при 80% степени деформации для  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз, а минимальная при 86% для  $\alpha$ - фазы и 83% для  $\beta$ - фазы.

3)  $\alpha$ - фаза более эластичная, чем  $\beta$ - фаза. Минимальная упругая составляющая работы деформации  $\eta_{IT}$  совершается при 80% степени предварительной деформации для  $\alpha$ - и  $\beta$ - фаз.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] 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.

[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] 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.

[4] Илларионова А.А. Титан и его применение в строительных и архитектурных сооружениях // В сборнике: Уральская школа молодых металлургов. материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов - молодых ученых. Из-во: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2017. С. 306–309.

[5] Niinomi Mitsuo, Kazuo Kagami. Recent topics of titanium research and development in Japan. «Ti-2015. Science and technology». Proceedings of the 13<sup>th</sup> World conference on titanium. San Diego. USA // The Minerals, Metals and Materials Society. 4 (2016) 27–40.

[6] Li J., Zhou J., Feng A., Huang S., Meng X., Sun Y., Sun Y., Tian X., Huang Y. Investigation on mechanical properties and microstructural evolution of TC6 titanium alloy subjected to laser peening at cryogenic temperature. Materials Science & Engineering A, (734) (2018) 291–298.

[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., Пилюгин 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] Тмаркин 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.



- [13] Панин П.В., Дзунович Д.А., Лукина Е.А. Расчет эталонных интегральных интенсивностей рентгеновской дифракции для  $\alpha$ - и  $\beta$ -фаз в титановых сплавах // Труды ВИАМ. 2017. № 12 (60). С. 4.
- [14] Чаусов Н.Г., Марущак П.О., Пилипенко А.П., Маркашова Л.И. Влияние ударно-колебательно-го нагружения на механические свойства  $\alpha + \beta$  титановых сплавов // Механика машин, механизмов и материалов. 2017. № 3 (40). С. 96–101.
- [15] Ночовная Н.А., Ширяев А.А. Влияние режимов термической обработки на механические свойства и структуру экспериментальной композиции высокопрочного псевдо- $\beta$ -титанового сплава // Труды ВИАМ. 2018. № 6 (66). С. 22–29.
- [16] Ляхов А.В., Гадалов В.Н., Макарова И.А., Ельников Е.А., Ерохин Р.Ю., Гвоздев А.Е., Кутепов С.Н., Пантюхин О.В. Исследование влияния термоциклической обработки на спеченные псевдо- $\alpha$ -титановые сплавы // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 4. С. 219–227.
- [17] Макаров А.В., Скорынина П.А., Волкова Е.Г., Осинцева А.Л. Влияние нагрева на структуру, фазовый состав и микромеханические свойства метастабильной аустенитной стали, упрочненной наноструктурирующей фрикционной обработкой // Физика металлов и материаловедение. 2018. Т. 119. № 12. С. 1257–1264.
- [18] Яременко О.Б., Куранов А.Е., Васильцов С.Ю. Инструментальное индентирование как неразрушающий метод оценки механических характеристик конструкционных материалов // Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ – 2020): Сборник трудов V Международной научно-технической конференции в дистанционном формате. 2020. С. 274–278.
- [19] Скотникова М.А., Попов А.А., Иванова Г.В., Цветкова Г.В. Исследование свойств поверхностей сплавов с помощью инструментального индентирования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 5. С. 460–466.
- [20] Попов А.А. Повышение износостойкости инструмента при механической обработке трудно-обрабатываемых заготовок: научный доклад. <http://elib.spbstu.ru>. 2020. 25 с.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**СТРЕЛЬНИКОВА Ангелина Анатольевна** – *ведущий инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.*  
E-mail: [strelnikova.angelina@bk.ru](mailto:strelnikova.angelina@bk.ru)

**СКОТНИКОВА Маргарита Александровна** – *профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.*  
E-mail: [skotnikova@mail.ru](mailto:skotnikova@mail.ru)

**Дата поступления статьи в редакцию: 02.06.2021**

## REFERENCES

- [1] K.S. Senkevich, Perspektivy polucheniya i primeneniya gibridnykh konstruksiy i kompozitov iz titanovykh spлавov i nitinolaobzor // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Poroshkovaya metallurgiya i funktsionalnyye pokrytiya. 2017. № 4. S. 71–78.
- [2] M.Kh. Mukhametrakhimov, Primeneniye nanostrukturnykh materialov iz titanovogo splava vt6 v usloviyakh nizkotemperaturnoy sverkhplastichnosti // Sb. Kaybyshevskiye chteniya. Sbornik dokladov I mezhvuzovskoy molodezhnoy nauchnoy shkoly-konferentsii. 2018. S. 109–114.

[3] **V.N. Fedulov**, Rezhimy uprochneniya vysokoprochnogo ( $\alpha + \beta$ )-titanovogo splava vt23 dlya primeneniya v aviatsionnoy tekhnike // *Litye i metallurgiya*. 2018. № 3 (92). S. 141–147.

[4] **A.A. Illarionova**, Titan i yego primeneniye v stroitelnykh i arkhitekturnykh sooruzheniyakh // V sbornike: *Uralskaya shkola molodykh metallovedov. materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy Ural'skoy shkoly-seminara metallovedov – molodykh uchenykh*. Iz-vo: Uralskiy federalnyy universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. Yeltsina, 2017. S. 306–309.

[5] **Niinomi Mitsuo, Kazuo Kagami**, Recent topics of titanium research and development in Japan. «Ti-2015. Science and technology». Proceedings of the 13<sup>th</sup> World conference on titanium. San Diego. USA // *The Minerals, Metals and Materials Society*. 4 (2016) 27–40.

[6] **J. Li, J.Zhou, A. Feng, S. Huang, X. Meng, Y. Sun, Y. Sun, X. Tian, Y. Huang**, Investigation on mechanical properties and microstructural evolution of TC6 titanium alloy subjected to laser peening at cryogenic temperature. *Materials Science & Engineering A*, (734) (2018) 291–298.

[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] **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.

[13] **P.V. Panin, D.A. Dzunovich, Ye.A. Lukina**, Raschet etalonnykh integralnykh intensivnostey rentgenovskoy difraktsii dlya  $\alpha$ - i  $\beta$ -faz v titanovykh splavakh // *Trudy VIAM*. 2017. № 12 (60). S. 4.

[14] **N.G. Chausov, P.O. Marushchak, A.P. Pilipenko, L.I. Markashova**, Vliyaniye udarno-kolebatelnogo nagruzheniya na mekhanicheskiye svoystva  $\alpha + \beta$  titanovykh splavov // *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2017. № 3 (40). S. 96–101.

[15] **N.A. Nochovnaya, A.A. Shirayev**, Vliyaniye rezhimov termicheskoy obrabotki na mekhanicheskiye svoystva i strukturu eksperimentalnoy kompozitsii vysokoprochnogo psevdob-titanovogo splava // *Trudy VIAM*. 2018. № 6 (66). S. 22–29.

[16] **A.V. Lyakhov, V.N. Gadalov, I.A. Makarova, Ye.A. Yelnikov, R.Yu. Yerokhin, A.Ye. Gvozdev, S.N. Kutepov, O.V. Pantyukhin**, Issledovaniye vliyaniya termotsiklicheskoj obrabotki na spechennyye psevdob-titanovyie splavy // *Izvestiya Tuls'kogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2018. № 4. S. 219–227.

[17] **A.V. Makarov, P.A. Skorynina, Ye.G. Volkova, A.L. Osintseva**, Vliyaniye nagreva na strukturu, fazovyy sostav i mikromekhanicheskiye svoystva metastabilnoy austenitnoy stali, uprochnennoy nanostrukturiruyushchey friksionnoy obrabotkoy // *Fizika metallov i metallovedeniye*. 2018. T. 119. № 12. S. 1257–1264.

[18] **O.B. Yaremenko, A.Ye. Kuranov, S.Yu. Vasil'tsov**, Instrumentalnoye indentirovaniye kak nerazrushayushchiy metod otsenki mekhanicheskikh kharakteristik konstruksionnykh materialov // *Zhivuchest i konstruksionnoye materialovedeniye (ZhivKoM – 2020): Sbornik trudov V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii v distantsionnom formate*. 2020. S. 274–278.

[19] **M.A. Skotnikova, A.A. Popov, G.V. Ivanova, G.V. Tsvetkova**, Issledovaniye svoystv poverkhnosti splavov s pomoshchyu instrumentalnogo indentirovaniya // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye. 2020. T. 63. № 5. S. 460–466.

[20] **A.A. Popov**, Povysheniye iznosostoykosti instrumenta pri mekhanicheskoy obrabotke trudnoobrabatyvayemykh zagotovok: nauchnyy doklad. <http://elib.spbstu.ru>. 2020. 25 s.

### THE AUTHORS

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

**SKOTNIKOVA Margarita A.** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: [skotnikova@mail.ru](mailto:skotnikova@mail.ru)

**Received: 02.06.2021**