

## Деформирование и долговечность титанового сплава ВТ9 в условиях непропорционального малоциклового нагружения

С. Н. Шукаев

Национальный технический университет Украины, Киев, Украина

*Приведены результаты экспериментальных исследований малоциклового усталости титанового сплава ВТ9 при непропорциональном нагружении. Испытания на малоцикловую усталость при растяжении–кручении проводили на тонкостенных трубчатых образцах при пропорциональном и непропорциональном циклическом деформировании в условиях комнатной температуры.*

*Установлено, что циклическое упрочнение в установившемся состоянии при круговых циклах и циклах кручения (либо растяжения–сжатия) при одном и том же значении размаха эквивалентной деформации Мизеса является одинаковым. При непропорциональном нагружении образцов долговечность титанового сплава ВТ9 уменьшается в сравнении с пропорциональным, однако не настолько, как для нержавеющей сталей.*

**Введение.** Большинство элементов конструкций работает в условиях многоосного циклического нагружения. При этом различают такие виды нагружения, как простое (пропорциональное) и сложное (непропорциональное). В первом случае направляющий тензор напряжений остается постоянным в течение всего процесса нагружения, что при однородном напряженном состоянии имеет место, когда внешние нагрузки возрастают или убывают пропорционально одному общему параметру. В случае невыполнения данного условия нагружение классифицируется как сложное, или непропорциональное.

Результаты экспериментальных исследований [1–4 и др.] свидетельствуют о различии деформационных свойств материалов при пропорциональном и непропорциональном циклическом упругопластическом нагружении. Например, для ряда материалов характерен так называемый эффект дополнительного упрочнения, когда циклическое упрочнение при непропорциональном нагружении значительно выше упрочнения, возникающего при пропорциональном нагружении. При этом увеличение степени дополнительного упрочнения коррелирует с падением долговечности, т.е. чем больше степень дополнительного упрочнения, тем меньше число циклов до разрушения. В некоторых исследованиях [4, 5] зафиксировано снижение долговечности при непропорциональном малоцикловом нагружении на целый порядок. В работах [6, 7] показано, что степень циклического упрочнения при непропорциональном нагружении, а следовательно, и долговечность зависят от типа материала. Данный факт обуславливает актуальность исследования конструкционных материалов на “чувствительность” к непропорциональности малоциклового нагружения с дальнейшей классификацией их по этому признаку.

Цель настоящей работы – исследование процессов упругопластического деформирования и разрушения титанового сплава ВТ9 при непропорциональных режимах нагружения. Этот сплав широко используется при изго-

товлении деталей газотурбинных двигателей (диски, лопатки, кольца, крепежные и другие детали), которые работают в условиях многоосного (как правило, непропорционального) малоциклового нагружения. Установление степени его чувствительности к такому фактору, как непропорциональность нагружения, – весьма важная исследовательская задача, имеющая непосредственное практическое применение.

**Образцы, оборудование и методика эксперимента.** Жаропрочный титановый сплав BT9 системы Ti–Al–Mo–Zr–Si относится к двухфазным ( $\alpha + \beta$ )-сплавам мартенситного класса. Химический состав материала приведен в табл. 1. Микроструктура материала заготовок образцов состояла из ( $\alpha + \beta$ )-фаз равноосного строения и согласно инструкции ВИАМ № 1054-76 соответствовала второму типу по девятитипной шкале для пруткового материала.

Т а б л и ц а 1

Химический состав сплава BT9 (вес.%)

Материал	Al	Mo	Si	Fe	Zr	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C
Заготовка BT9	6,50	3,40	0,30	0,081	1,58	0,006	0,018	0,06
BT9 по ГОСТ 19807-74	5,8...7,0	2,8...3,8	0,20...0,35	0,25	0,8...2,0	0,015	0,050	0,10

Образцы изготавливали из прутков катаных диаметром 25 мм в состоянии поставки. Механические свойства материала, полученные при растяжении сплошных пятикратных цилиндрических образцов в условиях комнатной температуры, имеют следующие выборочные средние значения: предел пропорциональности – 758 МПа; предел текучести – 865 МПа; предел прочности – 973 МПа; относительное удлинение – 17%; относительное сужение – 45%; модуль упругости – 118 ГПа.

Для получения близкого к однородному напряженно-деформированного состояния использовали тонкостенные трубчатые образцы с такими номинальными размерами: наружный диаметр – 11 мм; толщина стенки – 0,5 мм; рабочая длина трубки – 20 мм. Плоское напряженное состояние в образце создавалось за счет совместного действия осевой силы и крутящего момента с контролем нагружения по деформациям (жесткий режим). Испытания проводили на установке с электромеханическим силовым приводом и программно-следящей системой управления. Осевые и сдвиговые деформации контролировались с помощью двух независимых контуров управления с обратной связью. Запись циклических диаграмм деформирования производилась на двухкоординатные самописцы типа Н-306. Геометрия образца и испытательное оборудование подробно описаны в [8, 9].

Испытания проводили по траекториям, построенным в пространстве полных деформаций, путем одновременного изменения величины амплитуд осевой деформации и деформации сдвига по синусоидальному закону:

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= \varepsilon_a \sin \omega t; \\ \gamma(t) &= \gamma_a \sin(\omega t + \theta),\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\omega \approx \pi / 30$  – круговая частота;  $\theta$  – угол сдвига фаз.

Ранее [10] представлены результаты экспериментальных исследований образцов сплава ВТ9, полученные при испытаниях на малоцикловую усталость в условиях пропорционального двухосного нагружения. (В дальнейшем при сопоставлении влияния пропорциональности и непропорциональности нагружения на свойства исследуемого сплава будем использовать результаты работы [10]).

Проведены циклические испытания двух типов при непропорциональном нагружении. В первом случае нагружение осуществляли со сдвигом фаз ( $\theta = \pi / 2$ ) между деформациями  $\varepsilon$  и  $\gamma$  при постоянном соотношении амплитуд деформаций (рис. 1,а) на трех уровнях амплитуды эквивалентной деформации в цикле по критерию Мизеса:

$$e_{\text{экв}} = \max \left[ \sqrt{\varepsilon^2 + (\gamma / \sqrt{3})^2} \right] = \text{const.} \quad (2)$$

Во втором случае реализованы две программы циклического нагружения, которые включали этапы пропорционального нагружения различного вида (на рис. 1,б прямые 1 и 2) и этапы нагружения с постоянной интенсивностью полной деформации (на рис. 1,б кривая 3). На всех этапах циклического деформирования образец нагружался до стабилизации свойств материала (20 циклов), после чего в момент разгрузки по соответствующей компоненте деформаций осуществлялся переход к следующему этапу. При этом амплитуда эквивалентной деформации в цикле поддерживалась постоянной  $e_{\text{экв}} = 1\%$ .

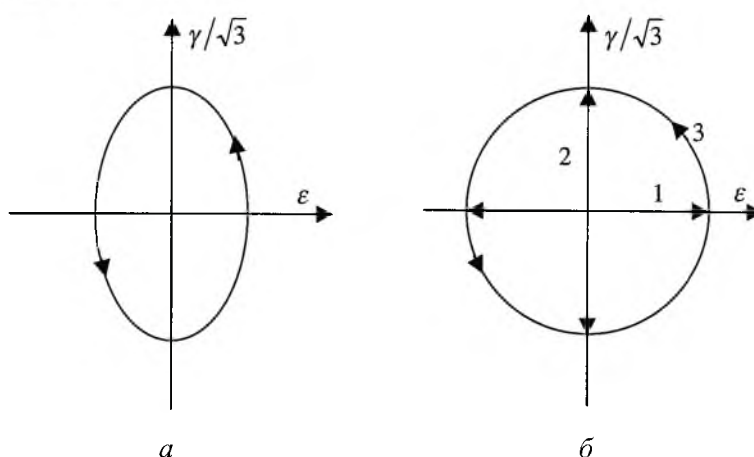


Рис. 1. Циклические траектории полной деформации: а – цикл непропорционального нагружения со сдвигом фаз  $\theta = 90^\circ$ ; б – этапы программного нагружения.

**Результаты эксперимента.** В табл. 2 приведены результаты усталостных испытаний при двухосном нагружении со сдвигом фаз  $\theta = 90^\circ$ . Там же наряду с величинами амплитуд полных деформаций, которые поддерживались постоянными в процессе малоциклового нагружения, представлены экспериментальные значения силовых, деформационных и энергетических параметров стабилизированных циклических диаграмм деформирования, где  $\sigma_a$  и  $\tau_a$  – соответственно амплитуды нормального и касательного напряжений;  $\varepsilon_a^p$  и  $\gamma_a^p$  – пластические составляющие осевой и сдвиговой деформаций;  $W_p$  и  $W_k$  – площади петель гистерезиса, соответствующие работам, выполняемым на осевых и сдвиговых пластических деформациях за цикл. Данные характеристики определяли из петель гистерезиса, соответствующих половине числа циклов до разрушения. При этом момент разрушения фиксировали по появлению в образце сквозной трещины длиной порядка 1 мм. Таким образом,  $N$  – число циклов до появления в образце сквозной трещины.

Т а б л и ц а 2

**Результаты испытаний на малоцикловую усталость образцов сплава ВТ9 при несинфазном нагружении ( $\theta = \pi/2$ ,  $\lambda = \gamma_a / \varepsilon_a = 2,4$ )**

Параметры нагружения			Экспериментальные данные						
$e_{\text{экв}}, \%$	$\varepsilon_a, \%$	$\gamma_a, \%$	$\sigma_a, \text{МПа}$	$\tau_a, \text{МПа}$	$\varepsilon_a^p, \%$	$\gamma_a^p, \%$	$W_p, \text{МДж/м}^3$	$W_k, \text{МДж/м}^3$	$N, \text{цикл}$
0,7	0,50	1,21	553	442	0,05	0,25	0,64	4,24	277
0,7	0,50	1,21	571	431	0,04	0,25	0,71	4,10	290
1,0	0,72	1,73	740	471	0,15	0,43	3,42	5,52	105
1,0	0,72	1,73	731	490	0,12	0,41	3,23	5,13	178
1,3	0,95	2,25	823	520	0,26	0,83	8,50	13,20	68
1,3	0,95	2,25	814	531	0,25	0,84	7,51	13,17	68

В результате статистической обработки экспериментальных данных построено уравнение эмпирической линии регрессии, которое связывает долговечность  $N$  с амплитудой эквивалентной деформации в цикле  $e_{\text{экв}}$ :

$$\lg N = 2,14 - 2,29(\lg e_{\text{экв}} + 2,014). \quad (3)$$

На рис. 2 в двойных логарифмических координатах  $e_{\text{экв}} - N$  изображены медианные кривые малоциклового усталости при растяжении–сжатии, кручении и непропорциональном нагружении со сдвигом фаз.

Сравнение кривых усталости показывает, что при переходе от пропорционального нагружения к непропорциональному происходит падение долговечности. Долговечность в условиях непропорционального нагружения уменьшается в два раза по сравнению с таковой при растяжении–сжатии, что значительно меньше величины падения долговечности образцов из нержавеющей стали при аналогичных испытаниях.

Т а б л и ц а 3

## Результаты испытаний образцов из сплава ВТ9 при программном нагружении

Программа	№ этапа нагружения	Тип траектории	$\varepsilon_a, \%$	$\gamma_a, \%$	$\varepsilon_a^p, \%$	$\gamma_a^p, \%$	$\sigma_a, \text{МПа}$	$\tau_a, \text{МПа}$	$S, \text{МПа}$	$W_p, \text{МДж/м}^3$	$W_k, \text{МДж/м}^3$	$W, \text{МДж/м}^3$
А	1	1	1	–	0,14	–	905	–	905	4,87	–	4,87
	2	2	–	1,73	–	0,55	–	546	946	–	9,20	9,20
	3	1	1	–	0,14	–	913	–	913	5,16	–	5,16
	4	3	1	1,73	0,28	0,29	865	522	943	8,35	4,60	13,00
	5	1	1	–	0,14	–	902	–	902	4,62	–	4,62
	6	3	1	1,73	0,26	0,35	867	528	940	7,92	5,56	13,50
	7	2	–	1,73	–	0,56	–	525	909	–	9,25	9,25
	8	3	1	1,73	0,24	0,38	862	525	932	7,71	6,13	13,80
	9	2	–	1,73	–	0,59	–	525	909	–	10,20	10,20
	10	1	1	–	0,14	–	896	–	896	4,94	–	4,94
Б	1	2	–	1,73	–	0,56	–	556	963	–	9,32	9,32
	2	1	1	–	0,13	–	913	–	913	4,82	–	4,82
	3	2	–	1,73	–	0,54	–	552	956	–	9,16	9,16
	4	3	1	1,73	0,23	0,29	903	553	984	7,18	4,89	12,10
	5	2	–	1,73	–	0,55	–	546	946	–	9,22	9,22
	6	3	1	1,73	0,27	0,26	886	546	977	8,15	5,05	13,20
	7	1	1	–	0,17	–	909	–	909	5,84	–	5,84
	8	3	1	1,73	0,26	0,31	893	545	976	8,32	4,92	13,20

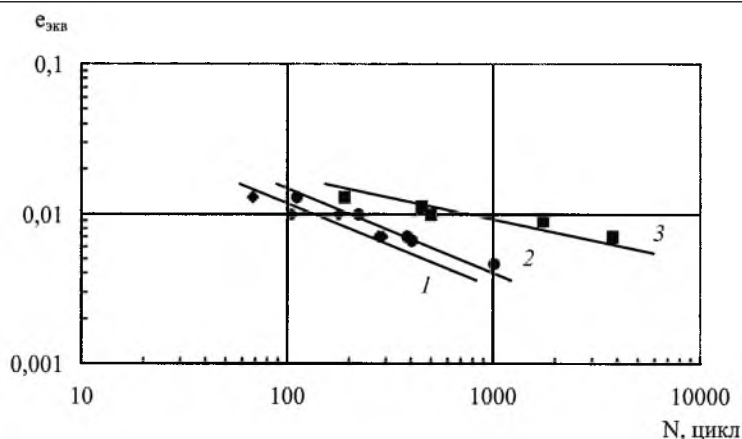


Рис. 2. Кривые малоциклового усталости сплава BT9 при непропорциональном нагружении (1), растяжении-сжатии (2) и кручении (3).

Сопоставление диаграмм упругопластического деформирования, полученных при пропорциональном и непропорциональном нагружении, свидетельствует о малой чувствительности исследуемого сплава к форме траектории нагружения. Дополнительное упрочнение, характерное для режимов непропорционального нагружения, например, тех же нержавеющей сталей, в проведенных испытаниях не наблюдалось.

Для более детального изучения упругопластического поведения материала в условиях непропорционального нагружения реализованы программы нагружения А и Б с параметрами, указанными в табл. 3. Там же представлены силовые, деформационные и энергетические параметры циклических диаграмм деформирования. Кроме рассмотренных выше параметров петель упругопластического гистерезиса дополнительно введены такие характеристики:  $S = \max \left[ \sqrt{(\sigma^2 + 3\tau^2)} \right]$  — амплитуда интенсивности напряжения в цикле;  $W = W_p + W_k$  — суммарная работа на пластических деформациях за цикл.

Как при пропорциональном, так и непропорциональном циклическом нагружении титановый сплав BT9 вел себя как циклически стабилизирующийся материал. Стабилизация петли гистерезиса наступала, как правило, в течение 2...10 циклов. Разницу в процессах стабилизации наблюдали на этапах чистого растяжения-сжатия (на рис. 1,б траектория 1) и кручения (на рис. 1,б траектория 2). В режиме растяжение-сжатие материал стабилизировался практически сразу, в режиме кручение прежде чем стабилизироваться, материал какое-то число циклов слабо разупрочнялся.

На рис. 3, 4 экспериментальные данные представлены в виде диаграмм, которые иллюстрируют изменение параметров  $S$  и  $W$  в зависимости от этапа нагружения. Каждая траектория деформирования обозначена разной штриховкой.

Видно, что существуют несколько зависящих от вида траектории деформирования состояний стабилизации материала. При этом следует заметить, что отличие между видами нагружения по амплитуде интенсивности

напряжений  $S$  лежит в пределах 5%, что сопоставимо с погрешностью измерений. Уровни амплитуд напряжений практически постоянны для конкретной траектории деформирования и не зависят от очередности нагружения. При переходе к непропорциональному циклическому деформированию (на рис. 1,б траектория 3) амплитуда касательных напряжений не изменялась, а амплитуда нормального напряжения даже уменьшилась. Все это свидетельствует о том, что упругопластическое деформирование титанового сплава ВТ9 при непропорциональном нагружении существенно отличается от процессов деформирования, характерных, например, для нержавеющей сталей. Такие эффекты непропорционального нагружения, как “дополнительное” и “поперечное” упрочнение, а также частичное разупрочнение при переходе от непропорционального нагружения к пропорциональному в настоящих исследованиях не зафиксированы.

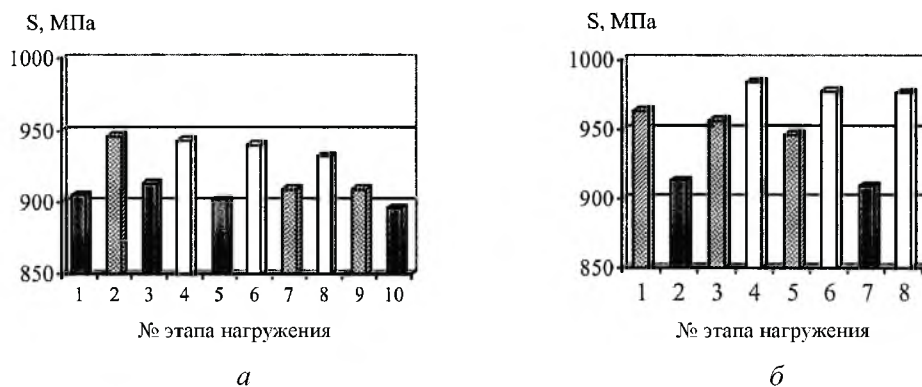


Рис. 3. Диаграммы изменения максимальной амплитуды интенсивности напряжения в цикле. (Здесь и на рис. 4: *a* – программа испытаний А; *б* – программа испытаний Б.)

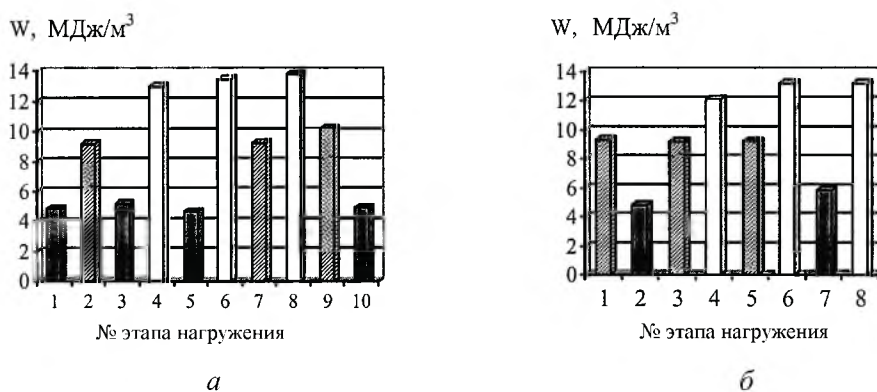


Рис. 4. Диаграммы изменения работы на пластических деформациях за цикл.

Чувствительность исследуемого сплава к виду траектории нагружения становится более заметной при анализе деформационных и энергетических характеристик циклических диаграмм деформирования. Из табл. 3 видно, что при переходе от пропорциональных режимов нагружения к непропорциональному происходит существенное изменение амплитуд пластических со-

ставляющих деформации. Причем если амплитуда осевой пластической деформации возрастает, то амплитуда пластической деформации сдвига уменьшается. Значения суммарной работы на пластических деформациях за цикл при непропорциональном нагружении существенно (в 1,4...2,6 раза) превышают таковые, полученные в условиях пропорциональных режимов нагружения (рис. 4). Это несколько меньше чем, например, для нержавеющей стали X18H10T [11], где увеличение суммарной работы на пластических деформациях при непропорциональном нагружении по траектории в виде квадрата по сравнению со случаем одноосного растяжения–сжатия достигало 3,6 раза (следовательно, при нагружении по окружности оно должно быть еще большим).

С учетом снижения долговечности и изменения деформационных и энергетических параметров циклических диаграмм деформирования при переходе от пропорционального к непропорциональному нагружению титановый сплав ВТ9 можно классифицировать как материал, чувствительный к режиму нагружения.

**Заключение.** Показано, что циклическое упрочнение титанового сплава ВТ9 при совпадающем и несовпадающем по фазе двухосном малоцикловом нагружении является практически одинаковым. Обнаружено изменение ширины петли уругонпластического гистерезиса растяжения–сжатия и кручения при переходе к режиму непропорционального нагружения, приводящее к возрастанию суммарной работы на пластических деформациях за цикл. Данный эффект может служить объяснением наблюдавшегося при несинфазном нагружении падения долговечности.

В целом результаты эксперимента дают основание считать, что сплав ВТ9 является малочувствительным к такому фактору, как форма траектории нагружения.

## Резюме

Наведено результати експериментальних досліджень малоциклової втоми титанового сплаву ВТ9 при непропорційному навантаженні. Виробування на малоциклово втому при розтязі–крученні проведено на тонкостінних трубчатих зразках при пропорційному і непропорційному циклічному деформуванні в умовах кімнатної температури.

Встановлено, що циклічне зміцнення у стабілізованому стані при колових циклах і циклах кручення (або розтязі–стиску) при одному і тому ж значенні розмаху еквівалентної деформації Мізеса є однаковим. При непропорційному навантаженні зразків у порівнянні з пропорційним довговічність титанового сплаву ВТ9 зменшується, але не настільки, як для нержавіючих сталей.

1. *Benallal A. and Marquis D.* Constitutive equations for nonproportional cyclic elastoviscoplasticity // *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Techn.* – 1987. – **109**, No. 4. – P. 326 – 336.



2. McDowell D. L. An experimental study of the structure of constitutive equations for nonproportional cyclic plasticity // *Ibid.* – 1985. – **107**. – P. 307 – 315.
3. Апайчев М. В., Иванов И. А. Понькин А. П. Моделирование эффектов изотропного упрочнения при непропорциональном циклическом нагружении // *Пробл. прочности.* – 1991. – № 7. – С. 47 – 51.
4. Можаровский Н. С., Шукаев С. Н. Долговечность конструкционных материалов при непропорциональных путях малоциклового нагружения // *Там же.* – 1988. – № 10. – С. 47 – 54.
5. Kanazawa K., Miller K. J., and Brown M. W. Low-cycle fatigue under out-of-phase loading conditions // *Trans. ASME, J. Eng. Mater. Techn.* – 1977. – **99**. – P. 222 – 228.
6. Doong S. H., Socie D. F., and Robertson I. M. Dislocation substructures and nonproportional hardening // *Ibid.* – 1990. – **112**, No. 4. – P. 456 – 464.
7. Зубчанинов В. Г., Охлопков Н. Л. Упрочнение конструкционных материалов при сложном деформировании по замкнутым плоским траекториям // *Пробл. прочности.* – 1997. – № 3. – С. 19 – 29.
8. Можаровский Н. С., Шукаев С. Н., Рудаков К. И. и др. Испытательный комплекс и методика исследования статической и малоциклового прочностии конструкционных материалов при простом и сложном нагружении в условиях плоского напряженного состояния // *Там же.* – 1986. – № 7. – С. 105 – 110.
9. Шукаев С. Н., Юфа М. М., Пономаренко Т. Б. Устройство для измерения осевой и сдвиговой деформации трубчатого образца при малоцикловом нагружении // *Вест. Киев. политех. ин-та. Машиностроение.* – 1987. – Вып. 24. – С. 64 – 67.
10. Shukaev S. N. Criteria for limiting condition of metal alloys under biaxial low-cycle fatigue // *Proc. of the 5th Inter. Conf. Biaxial-Multiaxial Fatigue and Fracture.* – Stacow, 1997. – **1**. – P. 207 – 220.
11. Шукаев С. Н. Пластичность стали X18H10T при циклическом деформировании по непропорциональным траекториям // *Вест. Киев. политех. ин-та. Машиностроение.* – 1992. – Вып. 29. – С. 35 – 42.

Поступила 09. 12. 99