

ISSN 2223-0807

Современное машиностроение: Наука и образование 2024:
материалы 13-й Международной научной конференции, 20 июня 2024 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024.

УДК 669.295

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-127

Ю.Б. Егорова¹, Л.В. Давыденко², С.Б. Белова³, Е.Н. Егоров⁴

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ



¹Юлия Борисовна Егорова,
Московский авиационный институт
Россия, Москва
Тел.: (917)556-8258, e-mail: egorova_mati@mail.ru



²Людмила Васильевна Давыденко
Московский политехнический университет
Россия, Москва
Тел.: (926)116-7666, e-mail: mami-davidenko@mail.ru



³Светлана Борисовна Белова
Московский авиационный институт
Россия, Ступино, Московская область
Тел.: (910)453-4825, e-mail: belovamai@gmail.com



⁴Евгений Николаевич Егоров
Московский авиационный институт
Россия, Москва
Тел.: (917)556-8258, e-mail: aravir_ene@mail.ru

Аннотация

В работе рассмотрены вопросы прогнозирования 100-часовой длительной прочности листов и прутков из α -, псевдо α - и $\alpha+\beta$ -титановых сплавов при температурах 200-600°C. На основе обобщения литературных данных проанализированы температурные зависимости длительной прочности отожженных полуфабрикатов из титановых сплавов разных классов. Проведено сопоставление пределов длительной и кратковременной прочности при температурах эксплуатации. Разработаны модели для теоретического обоснования уровня 100-часовой длительной прочности

титановых сплавов в интервале температур до 500-550°C на основе результатов кратковременных механических испытаний на растяжение.

Ключевые слова: титановые сплавы, предел прочности, предел длительной прочности, температура испытания, статистический анализ, прогнозирование.

Введение

Титановые сплавы относятся к материалам, предназначенным для эксплуатации в широком интервале температур: от криогенных до повышенных. Благоприятное сочетание удельной прочности, жаропрочности и коррозионной стойкости способствует тому, что титан и его сплавы широко применяют в различных отраслях промышленности: от медицины до авиации и космоса [1–6]. Область применения титановых сплавов определяется конкретными требованиями к деталям, узлам и изделиям. Конструкционные сплавы применяют до температур 300–450 °С, в то время как жаропрочные – до 500–600°C (кратковременно до 650 °С). Для оценки возможности применения титана и его сплавов при температурах выше 20°C обычно проводят испытания на растяжение, длительную прочность и ползучесть. Если надежность работы изделия зависит от деформации при ползучести, то показателем жаропрочности материала служит предел ползучести. В том случае, когда выход изделия из эксплуатации обусловлен его разрушением, то показателем жаропрочности является длительная прочность или долговечность.

Отечественные сплавы сопоставляют по длительной прочности, в то время как за рубежом принято сопоставление по сопротивлению ползучести [1]. Для оценки предела длительной прочности обычно проводят экспериментальные исследования, которые связаны с продолжительными испытаниями в течение 50 – 5000 ч при повышенных температурах. Для сопоставления жаропрочности различных материалов наиболее часто используют 100-часовую длительную прочность, так как эта характеристика определена для большинства сталей и сплавов.

Другое направление оценки жаропрочности заключается в установлении количественных соотношений между ползучестью, длительной и кратковременной прочностью или другими механическими свойствами [7-11]. Данный метод менее трудоемок, поскольку не требует длительных испытаний при определении характеристик жаропрочности. Однако механические свойства титановых сплавов в значительной степени зависят от колебаний химического состава и структуры [1, 12]. В связи с этим важное значение приобретает развитие теоретических исследований в области жаропрочности титановых сплавов, основанных на вероятностно-

статистическом прогнозировании механических свойств полуфабрикатов в зависимости от различных факторов [13-15].

Цель настоящей работы состояла в разработке статистических методов прогнозирования длительной прочности титановых сплавов на основе результатов кратковременных механических испытаний.

Исходные материалы и методика проведения исследований

В работе была исследована 100-часовая длительная прочность прутков и листов 28 серийных и опытных отечественных титановых сплавов после отжига по стандартным режимам (табл. 1).

Таблица 1. Исследованные полуфабрикаты из титановых сплавов и типичное значение предела прочности при комнатной температуре [1, 2, 6]

№ пп	Класс сплава	Сплав	Полуфабрикат		Типичный предел прочности, МПа
			Лист	Пруток	
1	α	BT1-00	+	-	370
2		BT1-0	+	-	465
3		BT5	-	+	830
4		BT5-1	+	+	880
5		ПТ-7М	+	-	575
6	Псевдо α	BT18	-	+	1110
7		BT38	+	-	980
8		BT18У	-	+	1100
9		OT4-0	+	+	560
10		BT20	+	+	1000
11		AT3	+	-	800
12		AT4	+	-	820
13		BT41	-	+	1125
14		OT4-1	+	-	660
15		OT4-2	+	-	1100
16		OT4	+	+	785
17		BT4	+	-	930
18	$\alpha+\beta$	BT25	-	+	1130
19		BT6С	+	+	905
20		BT9	-	+	1120
21		BT6	+	+	950
22		BT8	-	+	1100
23		BT8М-1	-	+	1120
24		BT14	+	-	950
25		BT25У	-	+	1150
26		BT3-1	-	+	1100
27		BT23	+	-	1100
28		BT22	-	+	1175

Исходными данными для прогнозирования послужили литературные сведения [1, 2, 6, 16-30], в которых приведены типичные (или гарантированные) значения 100-часовой длительной прочности и предела прочности листов и прутков из отечественных сплавов разных классов после отжига по стандартным режимам.

Статистическую обработку проводили с помощью ППП Statistica. Был проведен корреляционно-регрессионный анализ при доверительной вероятности 0,95. Для сопоставления свойств сплавов была использована процедура «Сравнение регрессий». Исследованными факторами послужили 100-часовая длительная прочность, предел прочности при испытаниях на растяжение, температура испытания. Интервалы изменения исследованных факторов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Интервалы изменения исследованных факторов

№	Фактор	Единица измерения	Интервал
1	Предел длительной прочности, σ_{100}	МПа	90-850
2	Предел прочности, σ_b	МПа	100-1175
3	Температура испытания, t	°С	20-600°С

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 и 2 сопоставлены зависимости предела длительной прочности листов и прутков для различных титановых сплавов от температуры в интервале 200-650°С. Технический титан и малолегированные α -титановые сплавы теряют прочностные свойства при сравнительно невысоких температурах (рис. 1). При температурах до 400°С по уровню возрастания длительной прочности листов их можно расположить в следующий ряд: ВТ1-0 → ОТ4-0, ПТ-7М → ОТ4-1 → ВТ5-1, АТ3 → ОТ4 → ВТ6С → ВТ4 → ВТ6 → ВТ23 → ВТ20. При температурах выше 400°С: АТ3, ВТ5 → АТ4 → ВТ6 → ОТ4-2 → ВТ20 → ВТ38. Наиболее высокой жаропрочностью обладают листы из комплексно легированных псевдо α -сплавов ВТ20 и ВТ38. При этом наблюдается тенденция повышения предела длительной прочности с увеличением предела прочности σ_b^{20} , измеренного при комнатной температуре.

Для прутков длительная и кратковременная прочность при температурах ниже 400°С возрастают в следующей последовательности (рис. 2): ОТ4 ($\sigma_b^{20}=785$ МПа) → ВТ5-1 (880 МПа) → ВТ6С (905 МПа) → ВТ6 (950 МПа) → ВТ20 (1000 МПа) → ВТ3-1 (1100 МПа) → ВТ9 (1120 МПа). Для сплава ВТ22 (1175 МПа) длительная прочность при 300°С выше, чем у сплава ВТ3-1, а при 400°С – наоборот ниже. При температурах 400-500°С: ВТ5-1(880 МПа) → ВТ3-1 (1100 МПа) → ВТ20 (1000 МПа) → ВТ8 (1100 МПа) → ВТ9 (1120 МПа) → ВТ18У (1100 МПа) → ВТ25У (1150 МПа). При

температурах 400-500°C наиболее жаропрочным является $\alpha+\beta$ -сплав ВТ25У, но при более высоких температурах его превосходит псевдо α -сплав ВТ18У, хотя предел прочности последнего сплава ниже ВТ25У.

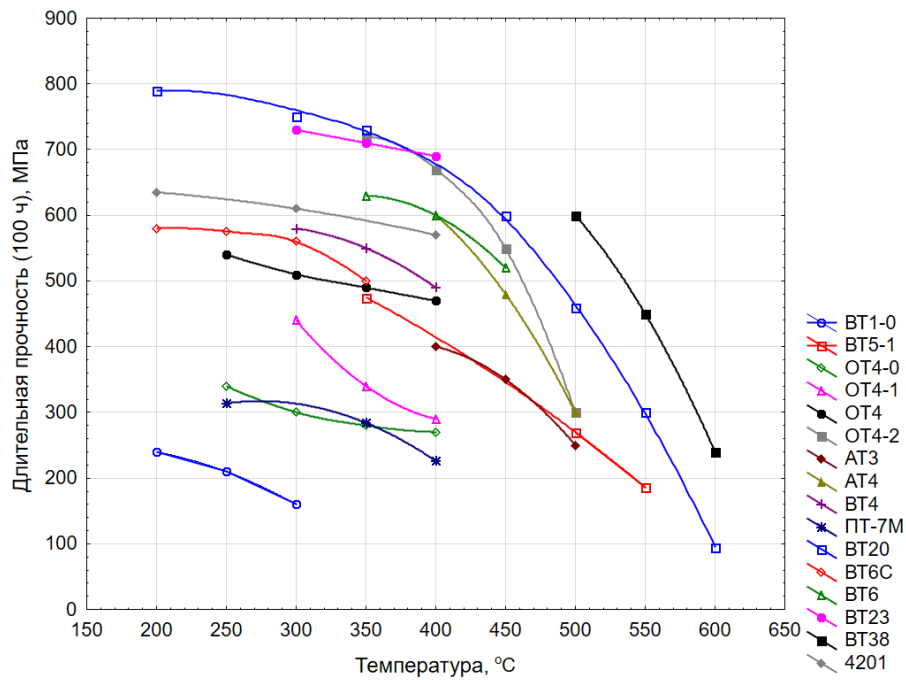


Рис. 1. Влияние температуры на 100-часовую длительную прочность отожженных листов титановых сплавов.

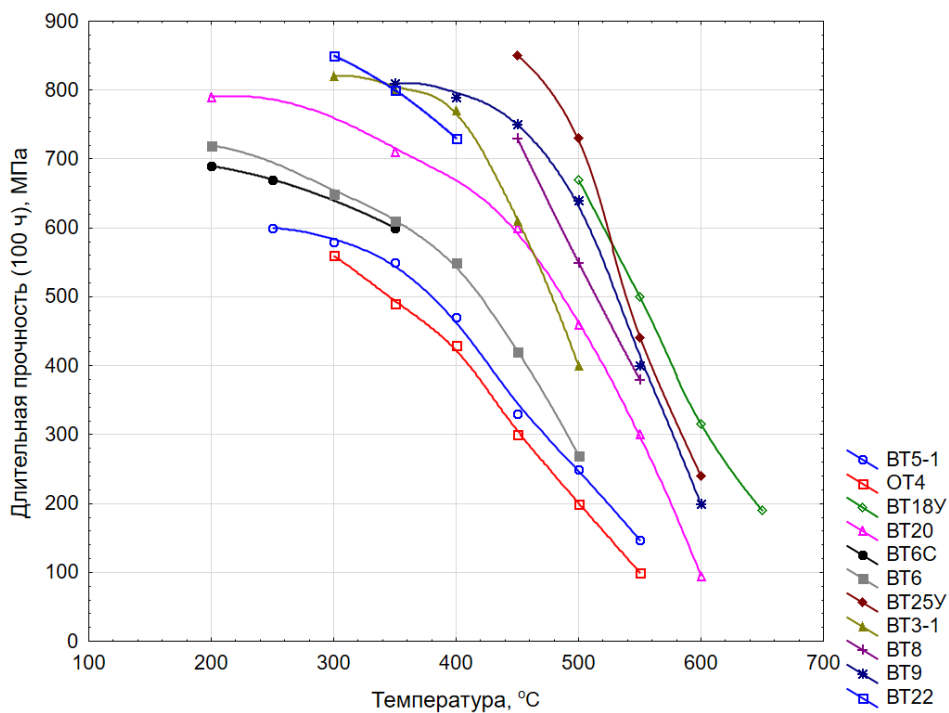


Рис. 2. Влияние температуры на 100-часовую длительную прочность отожженных прутков из титановых сплавов.

Для сплавов ВТ5-1, ОТ4-0, ОТ4, ВТ20, ВТ6С, ВТ6 на основе обобщения опубликованных сведений было проведено сопоставление прутков и листов по длительной прочности в зависимости от температуры. Для остальных сплавов такое сопоставление провести не удалось, так как для них отсутствуют сведения и для листов, и для прутков (табл. 1). На основе процедуры «Сравнение регрессий» было установлено, что пределы длительной прочности прутков и листов из сплавов ВТ5-1, ОТ4-0, ОТ4, ВТ20, ВТ6С, ВТ6 незначительно (со статистической точки зрения) отличаются друг от друга, поэтому они были объединены в единую статистическую совокупность.

В работе были сопоставлены кратковременный предел прочности при испытаниях на растяжение и 100-часовая длительная прочность. На рис. 3 приведено отношение длительной прочности к их кратковременной прочности в зависимости от температуры испытания:

$$k = \frac{\sigma_{100}^t}{\sigma_B^{20}}, k_t = \frac{\sigma_{100}^t}{\sigma_B^t},$$

где σ_{100}^t – 100-часовая длительная прочность при температуре t , σ_B^{20} – предел прочности при комнатной температуре, σ_B^t – предел прочности при температуре t . С повышением температуры испытания коэффициенты k и k_t уменьшаются, а разница между σ_B и σ_{100} увеличивается. В абсолютных величинах при температуре 200°C разница между σ_{100}^t и σ_B^t составляет 30-70 МПа, а при 600°C – приблизительно 150-200 МПа.

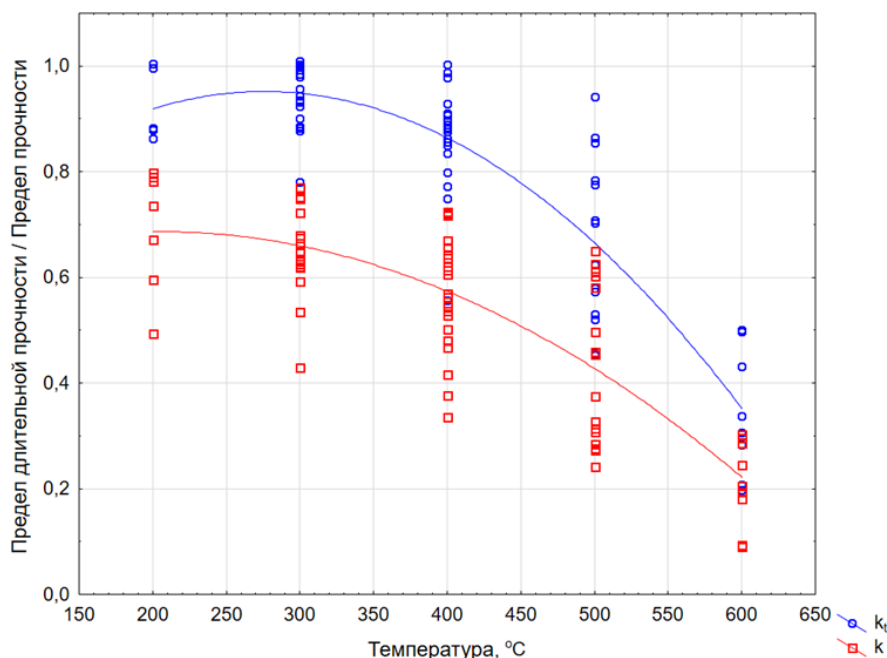


Рис. 3. Зависимость отношения длительной прочности титановых сплавов к их пределу

прочности от температуры: \square - $k = \frac{\sigma_{100}^t}{\sigma_B^{20}}$; \circ - $k_t = \frac{\sigma_{100}^t}{\sigma_B^t}$.

На следующем этапе исследований были проанализированы зависимости длительной прочности титановых сплавов при температурах 200-600°C от типичного значения предела прочности, измеренного при комнатной температуре (рис. 4). Наблюдается сильная корреляционная связь при всех исследованных температурах, которую можно описать регрессионным соотношением:

$$\sigma_{100} = \sigma_B^{20} - \sigma_t, \quad (2)$$

где σ_t - коэффициент регрессии, характеризующий абсолютную величину разупрочнения при испытаниях на длительную прочность, так что его можно назвать коэффициентом разупрочнения при различных температурах:

$$\sigma_t = 445 - 1,85 \cdot t + 0,004 \cdot t^2. \quad (3)$$

Анализ соотношений (2) и (3), а также рис. 4, показывает, что чем выше температура, тем в большей степени происходит разупрочнение сплава. При температуре 200°C разница σ_t между σ_{100} и σ_B^{20} составляет ~220 МПа, а при 600°C - ~860°C, при этом коэффициенты k и k_t уменьшаются в среднем с 0,7 до 0,2 и с 0,9 до 0,3 соответственно.

На основе обобщения моделей (2) и (3) получено соотношение, которое позволяет оценить типичное значение 100-часовой длительной прочности при различных температурах, если известен предел прочности сплава при комнатной температуре:

$$\sigma_{100} = \sigma_B^{20} - 445 + 1,85 \cdot t - 0,004 \cdot t^2, \quad (4)$$

Коэффициент корреляции равен 0,99, статистическая ошибка оценки σ_{100} составляет 15 МПа.

Предел прочности σ_B^{20} можно определить по результатам испытаний на растяжение при комнатной температуре или оценить теоретически. В работах [13; 14] для теоретической оценки (с доверительной вероятностью 0,95) предела прочности деформируемых полуфабрикатов из α -, псевдо α -, $\alpha+\beta$ -сплавов (после простого отжига по стандартным режимам) было предложено соотношение:

$$\sigma_B^{расч} = \sigma_0 + (60 \pm 5)[Al]_{экв}^{np} + (50 \pm 5)[Mo]_{экв}^{np} \quad (5)$$

Свободный член σ_0 зависит от типа полуфабриката, его структуры, конкретной технологии изготовления, и может быть определен на основе данных статистического контроля качества. В частности, по данным работы [14] свободный член равен $\sigma_0 = 300 \pm 25$ МПа для отожженных прутков диаметром 8-14 мм из α -, псевдо α -, $\alpha+\beta$ -сплавов с преимущественно глобулярной структурой. Если необходимо оценить только твердорастворное упрочнение, то можно принять $\sigma_0 = 235$ МПа, что соответствует пределу прочности титана высокой чистоты [1].

Для проверки адекватности соотношения (4) проведено сопоставление фактических и расчетных значений длительной прочности, которое показало их приемлемое соответствие. Предложенная

теоретическая оценка справедлива для α -, псевдо α - и $\alpha+\beta$ -сплавов при температурах менее 500-550°C, так как для большинства исследованных сплавов крайне недостаточно опубликованных сведений по длительной прочности при более высоких температурах (рис. 1 и 2).

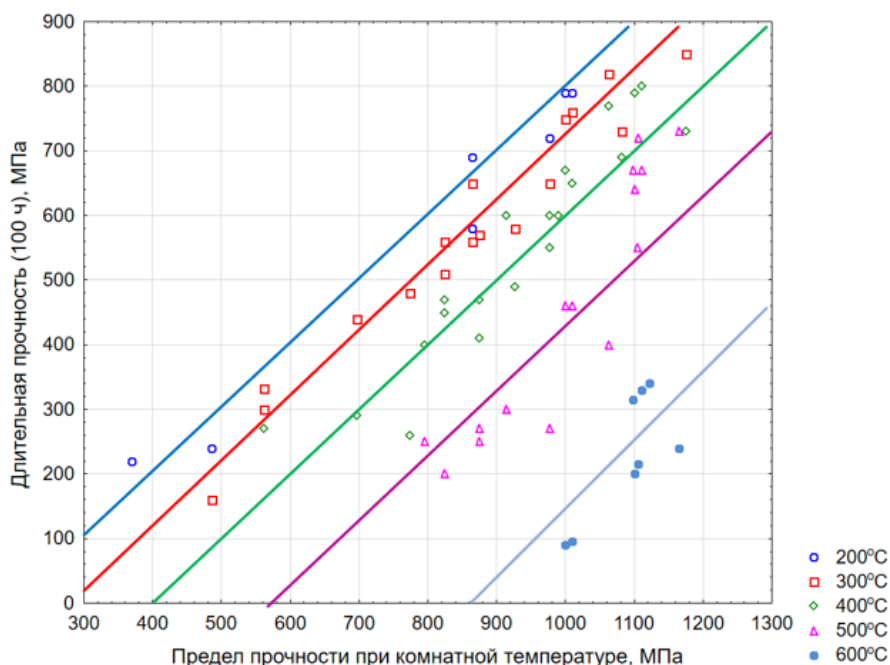


Рис. 4. Зависимость 100-часовой длительной прочности при температурах 200-600°C от предела прочности титановых сплавов при комнатной температуре.

Заключение

1. На основе обобщения литературных данных и нормативных сведений проведены статистические исследования температурных зависимостей 100-часового предела длительной прочности прутков и листов из титановых сплавов разных классов.
2. Проведено сопоставление пределов длительной и кратковременной прочности титановых сплавов, которое выявило значимые корреляционные связи между этими механическими характеристиками.
3. Предложены регрессионные модели, позволяющие провести теоретическую оценку (с доверительной вероятностью 0,95) типичного уровня 100-часовой длительной прочности отожженных полуфабрикатов из α -, псевдо α - и $\alpha+\beta$ -титановых сплавов при температурах 200-550°C, основываясь на результатах кратковременных механических испытаний при комнатной температуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС – МАТИ. 2009. 520 с.
- [2] Фридляндер И.Н., Сенаторова О.Г., Осинцев О.Е. и др. Машиностроение. Энциклопедия. Т. 2-3. Цветные металлы и сплавы / М.: Машиностроение. 2001, раздел 5, с. 585-586.
- [3] Gerd Lutjering, James C. Williams, Titanium. Springer Science & Business Media. 2013 г. 379 p.
- [4] Materials Properties Handbook. Titanium Alloys, ed. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings - OH, USA, ASM International, Materials Park. 1994. 1176 p.
- [5] Il'in, A.A., Scvortsova, S.V., Mamonov, A.M., Karpov, V.N. Production of medical implants from titanium-base materials. Metals. 2002. №3, pp.97-104.
- [6] Авиационные материалы: Справочник в 12 т. / под общ. ред. Е.Н. Каблова. Т.6 Титановые сплавы. М.: ВИАМ. 2010. 96 с.
- [7] Е.В. Чумаков. Исследование корреляции длительных и кратковременных механических свойств металлических материалов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2015. № 1(214), с. 165-179. <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-korrelyatsii-dlitelnyh-i-kratkovremennyh-mehanicheskikh-svoystv-metallicheskih-materialov>
- [8] Патент 2167244 РФ. Способ определения длительной прочности материала. Петров В.А., Петров Г.В. Опубликовано 27.02.2001.
- [9] Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение. 1998. 464 с.
- [10] C.C. Jiang, Z. Dong, X.L. Song, J. Jia, Z.D. Xiang. Long-term creep rupture strength prediction for a new grade of 9Cr martensitic creep resistant steel (G115)—An application of a new tensile creep rupture model. Journal of Materials Research and Technology, Volume 9, Issue 3, May–June 2020, P. 5542-5548. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420302891>
- [11] M. W. Spindler. Can Long Term Time to Rupture Data be Predicted Using Only Tensile Test Data. Conference: ECCS 2021 5th International Creep & Fracture Conference https://www.researchgate.net/publication/357086325_Can_Long_Term_Time_to_Rupture_Data_be_Predicted_Using_Only_Tensile_Test_Data
- [12] Egorova, Y.B., Davydenko, L.V., Belova, S.B., Chibisova, E.V. Theoretical and statistical basis for stability of titanium alloy Ti – 6% Al – 4%V

- semiproduct mechanical properties. *Metal Science and Heat Treatment*. 2018. Т. 60. № 5-6, pp. 277-284
- [13] Полькин И.С., Егорова Ю.Б., Давыденко Л.В. Моделирование состава и свойств титановых сплавов при комнатной и повышенных температурах. *Технология легких сплавов*. 2021. №2, с. 63-75.
- [14] Egorova Yu. B. , Uvarov V. N. , Davydenko L. V. , Davydenko R. A. Use of Industrial Monitoring Results for Predicting Mechanical Properties of Titanium Alloy Semiproducts. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017. V. 59. №5-6. P. 377-383.
- [15] Egorova Y.B., Kononov S.A., Davydenko L.V., Chelpanov A.V., Belova S.B. Statistical Study and Prediction of Mechanical Properties of Deformed semi-finished Products from Titanium Alloys. *Russian Metallurgy (Metally)*. Vol. 2023. No. 12, pp. 1854–1863.
- [16] Яковлев А.Л., Кашапов О.С., Путырский С.В., Алексеев Е.Б., Кочетков А.С. Современные направления развития титановых сплавов для авиационной техники. *Титан*. 2020. № 3-4, с.35-47.
- [17] Кашапов О.С., Павлова Т.В., Истракова А.Р., Калашников В.С. Повышение прочностных характеристик жаропрочных псевдо- α -титановых сплавов. *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S5, 73-80.
- [18] Моисеев В.Н. Конструкционные титановые сплавы и перспективы их развития. Наука. Производство и применение титана в условиях конверсии. I Международная научно-техническая конференция по титану стран СНГ. – М.: ВИЛС. 1994. Т.2. С. 567-582.
- [19] Шалин Р.Е., Ильенко В.М. Титановые сплавы для авиационных газотурбинных двигателей. *Титан*. 1995. №1-2 (5-6). С. 23-29.
- [20] Ночовная Н.А., Анташев В.Г., Ширяев А.А., Алексеев Е.Б. Выбор композиции нового жаропрочного титанового сплава с применением методов математического моделирования. *Титан*. 2015. № 1. С.10-17.
- [21] Глазунов С.Г., Ясинский К.К. Титановые сплавы для авиационной техники и других отраслей промышленности. *ТЛС*. 1993. №6-7. <https://www.viam.ru/public/>
- [22] Павлова Т.В., Кашапов О.С., Ночовная Н.А. Титановые сплавы для газотурбинных двигателей. Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №5, с. 8-14.
- [23] Шарапова Н.А., Живушкин А.А., Васильев А.В., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Иванов В.И. Использование новых титановых сплавов при формировании конструктивного облика компрессора перспективного авиационного двигателя. *Современные титановые сплавы и проблемы их развития*. М.: ВИАМ. 2010, с.62-68.
- [24] Кашапов О.С., Новак А.В., Ночовная Н.А., Павлова Т.В. Состояние, проблемы и перспективы создания жаропрочных титановых сплавов

- для деталей ГТД. Труды ВИАМ. 2013. №3. <http://viam-works.ru/ru/articles?year=2013&num=3>
- [25] Каблов Е.Н., Кашапов О.С., Павлова Т.В., Ночовная Н.А. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления полуфабрикатов из псевдо- α титанового сплава ВТ41. Титан. 2016. №2, с. 33-38.
- [26] О.С. Кашапов, Т.В. Павлова, В.С. Калашников, А.Р. Кондратьева. Исследование влияния содержания легирующих элементов на свойства высокопрочного жаропрочного псевдо- α -сплава ВТ46. Труды ВИАМ. 2016. №9 (45), с.44-52.
- [27] Кашапов О.С., Павлова Т.В., Истракова А.Р., Калашников В.С. Влияние содержания железа на механические свойства прутков из жаропрочного титанового сплава ВТ4. Труды ВИАМ. 2015. <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/784.pdf>
- [28] Беляев М.С., Горбовец М.А., Кашапов О.С., Ходинев И.А. Механические свойства и структура титанового сплава ВТ41. Цветные металлы. 2014. №8, с. 66-71.
- [29] Захаров Ю.А., Тетюхин В.В., Левин И.В., Шибанов А.С., Аржаков В.М. Производство штамповок дисков и лопаток вентилятора двигателей из высокопрочного титанового сплава ВТ22. Титан. 1996. №1, с.31-32.
- [30] Павлова Т.В., Кашапов О.С., Кондратьева А.Р., Калашников В.С. Возможности по расширению области применения сплава ВТ8-1 для дисков и рабочих колес компрессора. Труды ВИАМ. 2016. №3. <https://www.viam.ru/public/>

Yu.B. Egorova¹, L.V. Davydenko², S.B. Belova³, E.N. Egorov⁴,

PREDICTION OF LONG-TERM STRENGTH OF TITANIUM ALLOYS AT OPERATING TEMPERATURE

^{1,3,4} Moscow Aviation Institute, Russia;
²Moscow Polytechnic University, Russia

Abstract

The paper examines the issues of predicting the 100-hour long-term strength of sheets and rods made of α -, pseudo α - and $\alpha+\beta$ -titanium alloys at temperatures of 200-600°C. Based on a generalization of literature data, the temperature dependences of the long-term strength of annealed semi-finished products from titanium alloys of different classes are analyzed. A comparison was made of the limits of long-term and short-term strength at operating temperatures.

Models have been developed to theoretically substantiate the level of 100-hour long-term strength of titanium alloys in the temperature range up to 500-550°C based on the results of short-term mechanical tensile tests.

Key words: titanium alloys, tensile strength, limit of long-term strength, test temperature, statistical analysis, forecasting.

REFERENCES

- [1] Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. Titanium alloys. Composition, structure, properties. M.: VILS - MATI. 2009. 520 p. (rus.)
- [2] Fridlyander I.N., Senatorova O.G., Osintsev O.E. and others. Mechanical engineering. Encyclopedia. T. 2-3. Non-ferrous metals and alloys / M.: Mechanical Engineering. 2001, section 5, p. 585-586. (rus.)
- [3] Gerd Lutjering, James C. Williams, Titanium. Springer Science & Business Media. 2013 г. 379 p.
- [4] Materials Properties Handbook. Titanium Alloys, ed. by R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings - OH, USA, ASM International, Materials Park. 1994. 1176 p.
- [5] Il'in, A.A., Scvortsova, S.V., Mamonov, A.M., Karpov, V.N. Production of medical implants from titanium-base materials. Metals. 2002. №3, pp.97-104.
- [6] Aviation materials: Directory in 12 volumes / under general. ed. E.N. Kablova. T.6 Titanium alloys. M.: VIAM. 2010. 96 p. (rus.)
- [7] E.V. Chumakov. Study of the correlation of long-term and short-term mechanical properties of metallic materials // Scientific and Technical Journal of the St. Petersburg State Polytechnic University, 2015. No. 1(214), p. 165-179. (rus.) <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-korrelyatsii-dlitelnyh-i-kratkovremennyh-mehanicheskikh-svoystv-metallicheskikh-materialov>
- [8] Patent 2167244 RF. Method for determining the long-term strength of a material. Petrov V.A., Petrov G.V. Published 02.27.2001. (rus.)
- [9] Kablov E.N., Golubovsky E.R. Heat resistance of nickel alloys. M.: Mechanical engineering. 1998. 464 p. (rus.)
- [10] C.C. Jiang, Z. Dong, X.L. Song, J. Jia, Z.D. Xiang. Long-term creep rupture strength prediction for a new grade of 9Cr martensitic creep resistant steel (G115)—An application of a new tensile creep rupture model. Journal of Materials Research and Technology, Volume 9, Issue 3, May–June 2020, P. 5542-5548.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420302891>
- [11] M. W. Spindler. Can Long Term Time to Rupture Data be Predicted Using Only Tensile Test Data. Conference: ECCC 2021 5th International Creep & Fracture Conference

https://www.researchgate.net/publication/357086325_Can_Long_Term_Ti_me_to_Rupture_Data_be_Predicted_Using_Only_Tensile_Test_Data

- [12] Egorova, Y.B., Davydenko, L.V., Belova, S.B., Chibisova, E.V. Theoretical and statistical basis for stability of titanium alloy Ti – 6% Al – 4%V semiproduct mechanical properties. Metal Science and Heat Treatment. 2018. T. 60. № 5-6, pp. 277-284
- [13] Polkin I.S., Egorova Yu.B., Davydenko L.V. Modeling the composition and properties of titanium alloys at room and elevated temperatures. Light alloy technology. 2021. No. 2, p. 63-75. (rus.)
- [14] Egorova Yu. B. , Uvarov V. N. , Davydenko L. V. , Davydenko R. A. Use of Industrial Monitoring Results for Predicting Mechanical Properties of Titanium Alloy Semiproducts. Metal Science and Heat Treatment. 2017. V. 59. №5-6. P. 377-383.
- [15] Egorova Y.B., Kononov S.A., Davydenko L.V., Chelpanov A.V., Belova S.B. Statistical Study and Prediction of Mechanical Properties of Deformed semi-finished Products from Titanium Alloys. Russian Metallurgy (Metally). Vol. 2023. No. 12, pp. 1854–1863.
- [16] Yakovlev A.L., Kashapov O.S., Putyrsky S.V., Alekseev E.B., Kochetkov A.S. Modern directions of development of titanium alloys for aviation equipment. Titanium. 2020. No. 3-4, pp. 35-47. (rus.)
- [17] Kashapov O.S., Pavlova T.V., Istrakova A.R., Kalashnikov V.S. Improving the strength characteristics of heat-resistant pseudo- α -titanium alloys. Aviation materials and technologies. 2014. No. S5, 73-80. (rus.)
- [18] Moiseev V.N. Structural titanium alloys and prospects for their development. The science. Production and use of titanium under conversion conditions. I International scientific and technical conference on titanium of the CIS countries. – M.: VILS. 1994. T.2. pp. 567-582. (rus.)
- [19] Shalin R.E., Ilyenko V.M. Titanium alloys for aviation gas turbine engines. Titanium. 1995. No. 1-2 (5-6). pp. 23-29. (rus.)
- [20] Nochovnaya N.A., Antashev V.G., Shiryaev A.A., Alekseev E.B. Selecting the composition of a new heat-resistant titanium alloy using mathematical modeling methods. Titanium. 2015. No. 1. P.10-17. (rus.)
- [21] Glazunov S.G., Yasinsky K.K. Titanium alloys for aviation equipment and other industries. TLS. 1993. No. 6-7. (rus.) <https://www.viam.ru/public/>
- [22] Pavlova T.V., Kashapov O.S., Nochovnaya N.A. Titanium alloys for gas turbine engines. All materials. Encyclopedic reference book. 2012. No. 5, p. 8-14. (rus.)
- [23] Sharapova N.A., Zhivushkin A.A., Vasilyev A.V., Kashapov O.S., Pavlova T.V., Ivanov V.I. The use of new titanium alloys in shaping the design of the compressor of a promising aircraft engine. Modern titanium alloys and problems of their development. M.: VIAM. 2010, pp.62-68. (rus.)

- [24] Kashapov O.S., Novak A.V., Nochovnaya N.A., Pavlova T.V. State of the art, problems and prospects for creating heat-resistant titanium alloys for gas turbine engine parts. Proceedings of VIAM. 2013. No. (rus.) 3.<http://viam-works.ru/ru/articles?year=2013&num=3>
- [25] Kablov E.N., Kashapov O.S., Pavlova T.V., Nochovnaya N.A. Development of a pilot industrial technology for the production of semi-finished products from pseudo- α titanium alloy VT41. Titanium. 2016. No. 2, p. 33-38. (rus.)
- [26] O.S. Kashapov, T.V. Pavlova, V.S. Kalashnikov, A.R. Kondratieva. Study of the influence of the content of alloying elements on the properties of high-strength heat-resistant pseudo- α -alloy VT46. Proceedings of VIAM. 2016. No. 9 (45), pp. 44-52. (rus.)
- [27] Kashapov O.S., Pavlova T.V., Istrakova A.R., Kalashnikov V.S. The influence of iron content on the mechanical properties of rods made of heat-resistant titanium alloy VT4. Proceedings of VIAM. 2015. (rus.) <http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/784.pdf>
- [28] Belyaev M.S., Gorbovets M.A., Kashapov O.S., Khodinev I.A. Mechanical properties and structure of titanium alloy VT41. Non-ferrous metals. 2014. No. 8, p. 66-71. (rus.)
- [29] Zakharov Yu.A., Tetyukhin V.V., Levin I.V., Shibanov A.S., Arzhakov V.M. Production of stampings of engine fan discs and blades from high-strength titanium alloy VT22. Titanium. 1996. No. 1, pp. 31-32. (rus.)
- [30] Pavlova T.V., Kashapov O.S., Kondratyeva A.R., Kalashnikov V.S. Opportunities to expand the scope of application of VT8-1 alloy for compressor disks and impellers. Proceedings of VIAM. 2016. No. 3. (rus.) <https://www.viam.ru/public/>