

ISSN 2223-0807

Современное машиностроение: Наука и образование 2025:
материалы 14-й Международной научной конференции, 18 июня 2025 года
/ Под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. - СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.

УДК 669.295

doi:10.18720/SPBPU/2/id-156

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

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ ОТОЖЖЕННЫХ ПРУТКОВ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 С РАЗНОЙ СТРУКТУРОЙ



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, Москва
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

Проведено статистическое сопоставление ударной вязкости катаных прутков диаметром 15-150 мм из сплава ВТ6 с различной структурой после отжига. Показано, что при одинаковом химическом составе прутки с пластинчатой структурой имеют в среднем более высокие значения ударной вязкости по сравнению с глобулярной структурой. Свойства образцов со

смешанной (глобулярно-пластинчатой), переходной и корзинчатой структурами лежат между глобулярной и пластинчатой структурами.

Ключевые слова: титановые сплавы, эквиваленты по алюминию и молибдену, структура, предел прочности, ударная вязкость, статистические исследования, прогнозирование свойств.

Введение

Способность титановых сплавов сопротивляться разрушению можно оценить по результатам испытаний на вязкость разрушения, ударную вязкость образцов с надрезом и трещиной, на циклическую выносливость, замедленное разрушение, коррозионное растрескивание. Трещиностойкость титановых сплавов по результатам этих испытаний оценивают различными критериями, которые позволяют судить о работоспособности конструкций и деталей в различных условиях эксплуатации [1-3].

Наиболее широкое распространение получили испытания на ударный изгиб, так как они моделируют значительную концентрацию напряжений в вершине надреза и градиент напряжений за счет изгиба, что часто встречается в процессе эксплуатации сложных конструкций. В РФ ударная вязкость является обязательной характеристикой, которая регламентируется различной нормативной документацией (ГОСТ, ОСТ, ТУ и т.п.) на полуфабрикаты из титановых сплавов наряду с другими стандартными механическими свойствами (пределом прочности, относительным удлинением, поперечным сужением).

Следует иметь в виду, что механические свойства и способность титановых сплавов сопротивляться разрушению существенно зависят от химического состава, а также типа и параметров микроструктуры [1-16]. Для равноосных (глобулярных) структур характерны высокие кратковременные прочностные свойства, максимальная пластичность при пониженных значениях вязкости разрушения и характеристик жаропрочности, повышенной скорости роста трещин. Пластинчатые структуры обеспечивают высокую вязкость разрушения, характеристики жаропрочности и сопротивления развитию трещин при пониженных значениях сопротивления усталости, прочности и особенно пластичности.

Обзор литературных данных показал, что влияние типа структуры на ударную вязкость носит неоднозначный характер. По данным монографии [5] глобулярная структура в большинстве случаев обеспечивает более высокую ударную вязкость по сравнению с пластинчатой при испытаниях на динамический изгиб образцов «Менаже» с радиусом надреза 1,0 мм. В работах [6-11] сделан противоположный вывод. Сравнение вязкости разрушения, ударной вязкости и работы распространения трещины в

условиях динамического изгиба образцов из различных сплавов свидетельствует о преимуществе β -превращенной пластинчатой структуры перед мелкозернистой структурой глобулярного типа. Это объясняют тем, что пластинчатая структура обеспечивает более извилистый и более энергоемкий путь трещины, чем равновесная α -фаза в β -структуре.

Цель работы состояла в установлении статистических закономерностей совместного влияния химического состава, структуры и предела прочности на ударную вязкость отожженных прутков из титанового сплава ВТ6.

Методы

Объектами исследования послужили катаные прутки промышленного производства диаметром 15-155 мм из сплава ВТ6 (69 плавок) с разной структурой, которая была получена путем изменения режимов деформации и термической обработки. Прокатку проводили в разных температурных областях – ниже и выше температуры полиморфного превращения. Прутки были подвергнуты следующим видам отжига: простой отжиг (600-920 °С, 20-180 мин., охлаждение на воздухе или с печью), двойной (900-960 °С, 20-60 мин., воздух, 450-730 °С, 60-360 мин., охлаждение на воздухе), изотермический (850-1000 °С, 30-120 мин., охлаждение в печи до 500-750 °С, выдержка до 2 ч., охлаждение на воздухе).

Степень легирования сплавов оценивали с помощью структурных эквивалентов по алюминию и молибдену (% по массе) [1]:

$$[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} = Al + 0,33Sn + 0,17Zr + 10[O + C + 2N], \quad (1)$$

$$[Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{СТР}} = Mo + 0,7V + 1,7Cr + 1,7Mn + 2,5Fe, \quad (2)$$

Исследования микроструктуры проводили на оптическом микроскопе AXIO Observer.Alm (Karl Zeiss Jena, Германия). Анализ полученных изображений осуществляли с помощью программного комплекса NEXSYS ImageExpert Pro3.6. Все наблюдаемые структуры прутков были условно разделены на 5 типов: 1 – глобулярная (равноосная), 2 – переходная (с вытянутой формой зерен α -фазы), 3 – смешанная (глобулярная + пластинчатая), 4 – корзинчатого строения, 5 – пластинчатая.

Механические испытания на растяжение и ударную вязкость проводили при комнатной температуре в соответствии с ГОСТ 1497-84 и ГОСТ 9454-78. Статистический анализ был проведен с помощью ППП «STATISTICA» [17]. Исследованные факторы: структурные эквиваленты по алюминию и молибдену, предел прочности, ударная вязкость KCU, тип и параметры микроструктуры (толщина пластин первичной b_α и вторичной b_2 α -фазы, размер α -глобулей a_α), диаметр прутка.

Результаты и их обсуждение

Пластинчатые структуры формируются в том случае, когда деформация начинается и заканчивается при температурах β -области, т.е. выше температуры полиморфного превращения. Пластинчатая структура представлена β -зернами, по границам которых может быть расположена оторочка из α -фазы. Внутреннее строение зерен состоит из пластин α -фазы и прослоек из β -фазы (или из смеси α - и β -фаз). Пластины α -фазы могут быть образовывать α -колонии с одинаковой ориентацией α -пластин. Основными параметрами пластинчатой структуры являются размер β -зерен и α -колоний, а также толщина α -пластин b_α .

Глобулярная (равноосная) и переходная структура были сформированы деформацией при температурах $\alpha+\beta$ -области, т.е. ниже температуры полиморфного превращения. Глобулярная структура характеризуется частицами α -фазы, форма которых близка к сферической или немного вытянутой. Между частицами расположена прослойка β -фазы (или смесь α - и β -фаз). Переходная структура характеризуется наличием изогнутых α -пластин и удлинённых α -зерен. Основным параметром глобулярной структуры является толщина (диаметр) α -фазы a_α , а переходной - толщина α -зерен (пластин) b_α .

В смешанной (глобулярно-пластинчатой) структуре первичные α -зерна сохраняют форму, близкую к глобулярной, а вторичная α -фаза имеет пластинчатое строение. Основными параметрами смешанной структуры являются диаметр (толщина) частиц первичной α -фазы a_α и толщина пластин вторичной α -фазы b_2 .

В таблице 1 приведены параметры микроструктуры разного типа, предел прочности и ударная вязкость катаных прутков сплава ВТ6. Общий разброс предела прочности составляет 320 МПа, ударной вязкости – 1,0 МДж/м². Это обусловлено влиянием структурного фактора, диаметра прутка, колебаниями химического состава, режимами деформации и термической обработки и т.п. Абсолютный разброс химического состава в перерасчете на эквиваленты по алюминию и молибдену составляет 2,5% (масс.) и 1,6 % (масс.) соответственно. В результате суммарный статистический разброс (ширина трехсигмового интервала) достигает $[Al]_{\text{ЭКВ}}^{\text{стр}} + [Mo]_{\text{ЭКВ}}^{\text{стр}} = 4,0 \text{ \% (масс.)}$.

На рис. 1 сопоставлены зависимости механических свойств прутков из сплава ВТ6 с разной структурой от суммы структурных эквивалентов по алюминию и молибдену после простого отжига. При одинаковых эквивалентах прутки с глобулярной структурой имеют в среднем более высокие значения предела прочности (на ~60-100 МПа) по сравнению с пластинчатой структурой. Для ударной вязкости наблюдается обратная зависимость: КСЧ образцов с пластинчатой структурой в среднем выше,

чем с глобулярной на $\sim 0,2 \div 0,25$ МДж/м². Свойства образцов со смешанной, переходной и корзинчатой структурами лежат между глобулярной и пластинчатой структурами.

Таблица 1. Механические свойства отожженных* прутков диаметром 15-155 мм сплава ВТ6 в зависимости от типа структуры
(в числителе диапазон, в знаменателе – среднее)

Тип структуры	Число и доля образцов	Диаметр прутка, мм	$[Al]_{\text{экв}}^{\text{стр}}$ %	$[Mo]_{\text{экв}}^{\text{стр}}$ %	σ_b , МПа	KCU, МДж/м ²
1 (глобулярная) $a_\alpha = 2,1-9,3$ мкм	103 (30%)	15-90	$\frac{7,3-9,2}{8,6}$	$\frac{3,0-4,1}{3,3}$	$\frac{929-1076}{1013}$	$\frac{0,31-0,92}{0,49}$
2 (переходная) $b_\alpha = 1,3-5,5$ мкм	85 (25%)	18-155	$\frac{7,1-9,6}{8,5}$	$\frac{2,9-4,4}{3,4}$	$\frac{816-1100}{975}$	$\frac{0,34-1,31}{0,56}$
3 (смешанная) $a_\alpha = 2,9-9,5$ мкм $b_2 = 1,0-4,1$ мкм	97 (28%)	16-90	$\frac{7,1-9,2}{8,2}$	$\frac{2,8-3,9}{3,3}$	$\frac{788-1109}{970}$	$\frac{0,33-1,24}{0,58}$
4 (корзинчатая) $b_\alpha = 1,7-3,6$ мкм	14 (4%)	28-140	$\frac{7,2-9,1}{8,4}$	$\frac{3,0-3,6}{3,3}$	$\frac{897-1053}{991}$	$\frac{0,47-0,78}{0,67}$
5 (пластинчатая) $b_\alpha = 2,0-5,5$ мкм	45 (13%)	20-155	$\frac{7,2-9,3}{8,1}$	$\frac{2,9-4,4}{3,3}$	$\frac{818-1050}{896}$	$\frac{0,49-1,14}{0,8}$
1-5	344 (100%)	16-155	$\frac{7,1-9,6}{8,4}$	$\frac{2,8-4,4}{3,3}$	$\frac{788-1109}{976}$	$\frac{0,31-1,31}{0,57}$
ОСТ1 90173-75		10-60	-	-	900-1050	$\geq 0,4$
ОСТ1 90266-86		65-100	-	-	900-1050	$\geq 0,3$
ОСТ1 90266-86		от 110	-	-	835-1050	$\geq 0,3$

Примечание: * - все виды отжига.

Ориентировочную оценку ударной вязкости прутков из сплава ВТ6 с разной структурой можно провести по соотношению:

$$KCU = a_0 - (0,0015 \pm 0,0005) \sigma_b, \quad (3)$$

где a_0 - свободный член, который изменяется от 2,0 до 2,25 МДж/м² в зависимости от типа структуры (табл. 2). Значения свободного члена для глобулярной, смешанной и переходной структуры различаются незначительно. Для структуры «корзинчатого» типа не удалось получить адекватную модель, что связано с недостаточным объемом выборки.

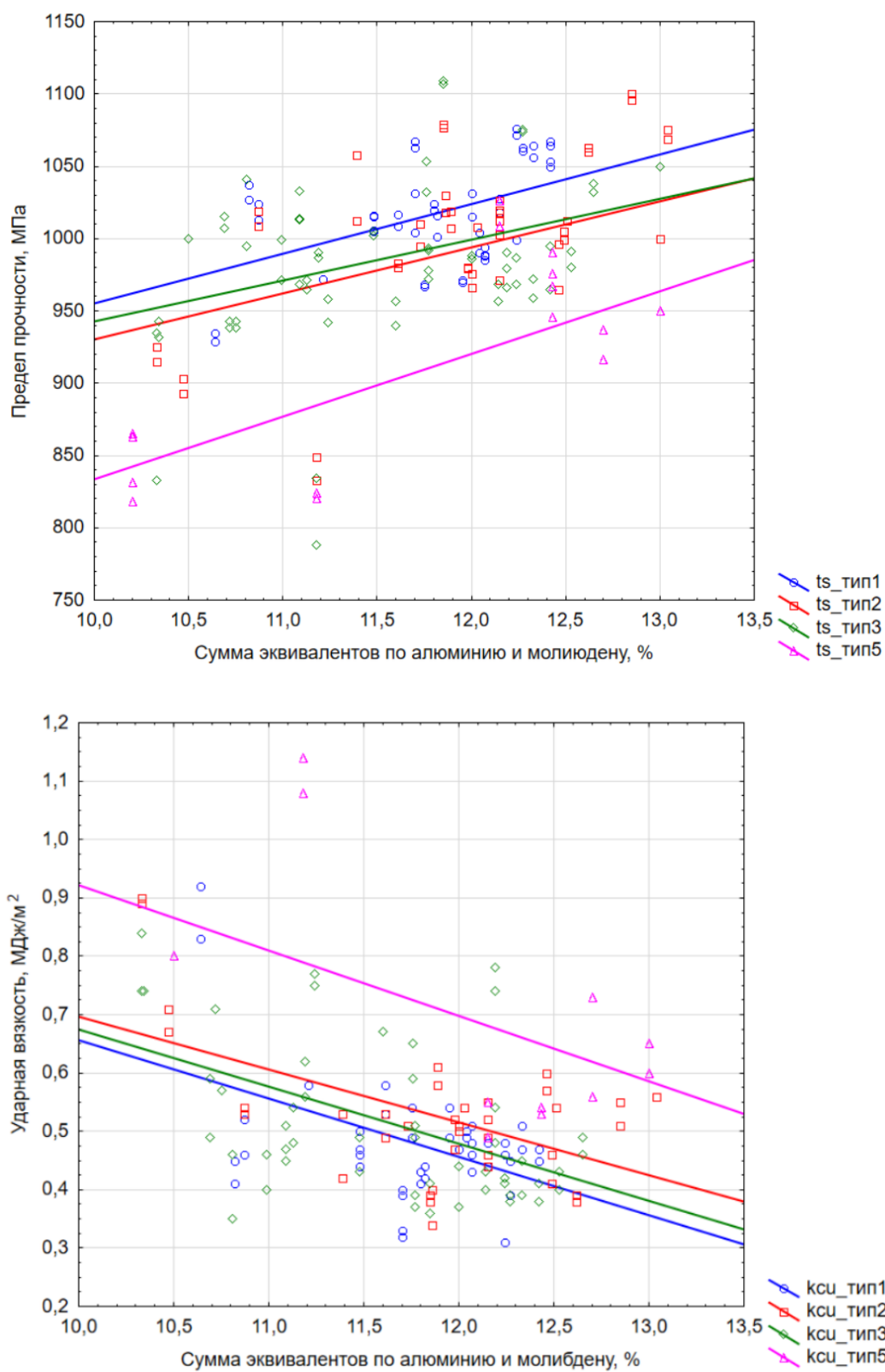


Рис. 1. Зависимость предела прочности и ударной вязкости прутков $\varnothing 15-60$ мм сплава ВТ6 от суммы эквивалентов по алюминию и молибдену (простой отжиг). Тип структуры: 1 – глобулярная, 2 – переходная, 3 – смешанная, 5 – пластинчатая.

Таблица 2. Значения свободного члена a_0 из соотношения (3) в зависимости от типа структуры

№	Тип структуры	a_0 , МДж/м ²	R
1	Глобулярная	$2,00 \pm 0,01$	-0,65
2	Переходная	$2,05 \pm 0,02$	-0,68
3	Смешанная (глобулярно-пластинчатая)	$2,02 \pm 0,02$	-0,63
4	Корзинчатая	-	-0,35
5	Пластинчатая	$2,25 \pm 0,03$	-0,74

Для всех типов структуры следует отметить довольно большой разброс механических свойств, что в первую очередь обусловлено влиянием параметров структуры [18, 19]. С увеличением размеров пластин и глобулярных частиц α -фазы наблюдается снижение предела прочности и рост ударной вязкости. Проведенный анализ показал, что если размер глобулей менее 5,0-6,0 мкм, а сумма эквивалентов по алюминию и молибдену более 11,5% (по массе), то прутки сплава ВТ6 с глобулярной структурой могут иметь ударную вязкость, не удовлетворяющую требованиям ОСТ.

Для прутков диаметром 15-60 мм с пластинчатой структурой КСУ удовлетворяет требованиям ОСТ при всех значениях эквивалентов по алюминию и молибдену в отличие от остальных типов структуры. Вместе с тем, предел прочности прутков с пластинчатой структурой и суммой эквивалентов менее 11,5 % (по массе) лежит ниже регламентируемых значений (900 МПа).

Проведенные исследования показали, что один и тот же уровень предела прочности и ударной вязкости можно достичь для любого типа структуры, варьируя химический состав и параметры структуры. Однако считается, что для обеспечения требуемого уровня различных механических свойств полуфабрикатов целесообразно формирование бимодальной (глобулярно-пластинчатой) структуры, состоящей из равноосных частиц первичной α -фазы и пластинчатой составляющей [11, 13, 20, 21]. Наиболее благоприятное сочетание всех свойств наблюдается, если количество первичной α -фазы соответствует 7-30 % [20]. Оценить этот вывод в настоящей работе не удалось, так как в исследованных прутках количество глобулярных частиц первичной α -фазы превышало 30%.

Сложность выбора оптимальной структуры полуфабрикатов из титановых сплавов связана с неоднозначностью ее влияния на различные свойства. Поэтому требования к комплексу всех служебных характеристик устанавливаются с учетом назначения полуфабрикатов для обеспечения максимального уровня именно тех показателей, которые определяют работоспособность деталей в процессе эксплуатации [5].

Заключение

1. Показано, что с увеличением степени легирования наблюдается увеличение предела прочности и снижение ударной вязкости прутков из сплава ВТ6 для всех типов структуры.
2. При одинаковом химическом составе отожженные прутки из сплава ВТ6 с глобулярной структурой имеют более высокие значения предела прочности по сравнению с пластинчатой структурой. Для ударной вязкости наблюдается обратная зависимость. Свойства образцов со смешанной, переходной и корзинчатой структурами лежат между глобулярной и пластинчатой структурами.
3. Предложено соотношение для ориентировочной оценки ударной вязкости отожженных прутков из сплава ВТ6 в зависимости от уровня прочности и типа структуры.
4. Установлено, что при размере глобулей менее 5,0-6,0 мкм и сумме эквивалентов по алюминию и молибдену более 11,5% (по массе) прутки сплава ВТ6 с глобулярной структурой могут иметь ударную вязкость, не удовлетворяющую нормативным требованиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС – МАТИ. 2009. 520 с.
- [2] Колачев Б.А., Мальков А.В. Физические основы разрушения титана. М.: Металлургия. 1983. 160 с.
- [3] Дроздовский Б.А., Прохорцева Л.В., Новосильцева Н.И. Трещиностойкость титановых сплавов. М.: Металлургия. 1983. 192 с.
- [4] Chandan Kumar, Sanjay Kumar; Ajay Kumar. Microstructure Properties Of (A+B) Titanium Alloys: A Review. International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET), Volume 11, Issue 12, December 2020.
- [5] Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Белозеров П.П. и др. Полуфабрикаты из титановых сплавов. М.: ВИЛС. 1996. 581 с.
- [6] Яковлев А.Л., Арисланов А.А., Путырский С.В., Ночовная Н.А. Исследование механических свойств и структуры крупногабаритных полуфабрикатов из титанового сплава ВТ6ч. Авиационные материалы и технологии. 2020. №4, с. 12-18.
- [7] Крохина В.А., Арисланов А.А., Путырский С.В., Наприенко С.А. Исследование влияния режимов термической обработки в β -области на структуру и механические свойства полуфабрикатов из сплава ВТ22М. Труды ВИАМ, 2023, №8, с.25-34.

- [8] Саркеева А.А., Лутфулин Р.Я., Круглов А.А., Астанин В.В. Влияние структуры на механическое поведение титанового сплава ВТ6 при ударном нагружении. Письма о материалах, 2012. Т.2, с. 99-102.
- [9] Lei Lei, Yongqing Zhao, Qinyang Zhao, Cong Wu, Shixing Huang, Weiju Jia, Weidong Zeng. Impact toughness and deformation modes of Ti-6Al-4V alloy with different microstructures. Materials Science and Engineering: A, Volume 801, 13 January 2021, P. 140411 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140411>
- [10] Yoji Mine, Shunsuke Katashima, Rengen Ding, Paul Bowen, Kazuki Takshima. Fatigue crack growth behaviour in single-colony lamellar structure of Ti-6Al-4. Scripta Materialia, Volume 165, May 2019, P. 107-111. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.02.029>
- [11] Junqiang Ren, Qi Wang, Binbin Zhang, Dan Yang, Xuefeng Lu, Xiaobo Zhang, Xudong Zhang, Jingyu Hu. Influence of microstructure on fatigue crack growth behavior of Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo alloy: Bimodal vs. lamellar structures. Intermetallics, Volume 130, March 2021, P. 107058. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.107058>
- [12] Xiaohui Shi, Weidong Zeng, Yu Sun, Yuanfei Han, Yongqing Zhao, Ping Guo. Microstructure-Tensile Properties Correlation for the Ti-6Al-4V Titanium Alloy. JMEPEG (2015) 24:1754–1762 .
- [13] Yan Chong, Guanyu Deng , Si Gao , Jangho Yi , Akinobu Shibata , Nobuhiro Tsuji. Yielding nature and Hall-Petch relationships in Ti-6Al-4V alloy with fully equiaxed and bimodal microstructures. Scripta Materialia, 2019, V. 172, November, pp. 77-82.
- [14] Daeho Jeong, Yongnam Kwon, Masahiro Goto, Sangshik Kim. High cycle fatigue and fatigue crackpropagation behaviors of β -annealed Ti-6Al-4V alloy. International Journal of Mechanical and Material Engeneearing, 2017, 12:1. DOI 10.1186/s40712-016-0069-8
- [15] Yu Sun, Weidong Zeng, Yuanfei Han, Yongqing Zhao, GuiWang, Matthew S.Dargusch, Ping Guo. Modeling the correlation between microstructure and the properties of the Ti-6Al-4V alloy based on an artificial neural network. Materials Science and Engineering: A, 2011, V. 528, Issues 29–30, 15 November, pp. 8757-8764.
- [16] R.K. Nallf, B.L. Boyce, J.P. Campbell, J.O. Peters, R.O. Ritchie. Influence of Microstructure on High-Cycle Fatigue of Ti-6Al-4V: Bimodal vs. Lamellar Structures. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, v. 37A, Marth, pp. 559-566.
- [17] Боровиков В.П., Ивченко Г.И. Прогнозирование в системе Statistica в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере. М.: Финансы и статистика. 2006. 368 с.
- [18] 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.
- [19] Yu. B. Egorova, S. V. Skvortsova, L. V. Davydenko, O. N. Gvozdeva Statistical comparison of mechanical properties of VT6 alloy bars with different structures // Metallurgist, Vol. 66, Nos. 7-8, November, 2022, p. 922-933. DOI 10.1007/s11015-022-01404-0
- [20] Брун М.Я., Шаханова Г.В. О структуре титановых сплавов и параметрах, определяющих ее многообразие. Технология металлов, 2009, №4, с. 41-47.
- [21] Yan Chong, Tilak Bhattacharjee, Nobuhiro Tsuji. Bi-lamellar microstructure in Ti–6Al–4V: Microstructure evolution and mechanical properties. Materials Science and Engineering: A, Volume 762, 5 August 2019, P. 138077. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138077>

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

STUDY OF IMPACT TIGHTNESS OF ANNEALED RODS OF VT6 TITANIUM ALLOY WITH DIFFERENT STRUCTURES

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

²Moscow Polytechnic University, Russia.

Abstract

A statistical comparison of the impact toughness of rolled rods of 15-150 mm diameter made of VT6 alloy with different structures after annealing was carried out. It was shown that with the same chemical composition, rods with a lamellar structure have, on average, higher impact toughness values compared to those with a globular structure. The properties of samples with mixed (globular-lamellar), transitional and basket structures lie between the globular and lamellar structures.

Key words: titanium alloys, aluminum and molybdenum equivalents, structure, tensile strength, impact toughness, statistical studies, property prediction.

REFERENCES

- [1] Ilyin A.A., Kolachev B.A., Polkin I.S. Titanium alloys. Composition, structure, properties. Moscow: VILS – MATI. 2009. 520 p. (rus)
- [2] Kolachev B.A., Malkov A.V. Physical principles of titanium destruction. Moscow: Metallurgy. 1983. 160 p. (rus)
- [3] Drozdovsky B.A., Prokhortseva L.V., Novosiltseva N.I. Crack resistance of titanium alloys. Moscow: Metallurgy. 1983. 192 p. (rus)

- [4] Chandan Kumar;Sanjay Kumar; Ajay Kumar . Microstructure Properties Of (α + β) Titanium Alloys: A Review. International Journal Of Advanced Research In Engineering And Technology (IJARET), Volume 11, Issue 12, December 2020
- [5] Aleksandrov V.K., Anoshkin N.F., Belozerov P.P. et al. Semi-finished products from titanium alloys. Moscow: VILS. 1996. 581 p. (rus)
- [6] Yakovlev A.L., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Nochovnaya N.A. Study of mechanical properties and structure of large-sized semi-finished products made of titanium alloy VT6ch. Aviation materials and technologies. 2020. No. 4, pp. 12-18. (rus)
- [7] Krokhnina V.A., Arislanov A.A., Putyrskiy S.V., Naprienko S.A. Study of the influence of heat treatment modes in the β -region on the structure and mechanical properties of semi-finished products made of VT22M alloy. Proceedings of VIAM, 2023, No. 8, pp. 25-34. (rus)
- [8] Sarkeeva A.A., Lutfulin R.Ya., Kruglov A.A., Astanin V.V. Influence of structure on the mechanical behavior of titanium alloy VT6 under impact loading. Letters on materials, 2012. Vol.2, pp. 99-102. (rus)
- [9] Lei Lei, Yongqing Zhao, Qinyang Zhao, Cong Wu, Shixing Huang, Weiju Jia, Weidong Zeng. Impact toughness and deformation modes of Ti–6Al–4V alloy with different microstructures. Materials Science and Engineering: A, Volume 801, 13 January 2021, P. 140411 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.140411>
- [10] Yoji Mine, Shunsuke Katashima, Rengen Ding, Paul Bowen, Kazuki Takshima. Fatigue crack growth behaviour in single-colony lamellar structure of Ti–6Al–4. Scripta Materialia, Volume 165, May 2019, P. 107-111. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.02.029>
- [11] Junqiang Ren, Qi Wang, Binbin Zhang, Dan Yang, Xuefeng Lu, Xiaobo Zhang, Xudong Zhang, Jingyu Hu. Influence of microstructure on fatigue crack growth behavior of Ti–6Al–3Nb–2Zr–1Mo alloy: Bimodal vs. lamellar structures. Intermetallics, Volume 130, March 2021, P. 107058. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.107058>
- [12] Xiaohui Shi, Weidong Zeng, Yu Sun, Yuanfei Han, Yongqing Zhao, Ping Guo. Microstructure-Tensile Properties Correlation for the Ti-6Al-4V Titanium Alloy. JMEPEG (2015) 24:1754–1762 .
- [13] Yan Chong, Guanyu Deng , Si Gao , Jangho Yi , Akinobu Shibata , Nobuhiro Tsuji. Yielding nature and Hall-Petch relationships in Ti-6Al-4V alloy with fully equiaxed and bimodal microstructures. Scripta Materialia, 2019, V. 172, November, pp. 77-82.
- [14] Daeho Jeong, Yongnam Kwon, Masahiro Goto, Sangshik Kim. High cycle fatigue and fatigue crackpropagation behaviors of β -annealed Ti-6Al-4V alloy. International Journal of Mechanical and Material Engeneearing, 2017, 12:1. DOI 10.1186/s40712-016-0069-8

- [15] Yu Sun, Weidong Zeng, Yuanfei Han, Yongqing Zhao, GuiWang, Matthew S.Dargusch, Ping Guo. Modeling the correlation between microstructure and the properties of the Ti–6Al–4V alloy based on an artificial neural network. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, V. 528, Issues 29–30, 15 November, pp. 8757-8764.
- [16] R.K. Nallf, B.L. Boyce, J.P. Campbell, J.O. Peters, R.O. Ritchie. Influence of Microstructure on High-Cycle Fatigue of Ti-6Al-4V: Bimodal vs. Lamellar Structures. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2006, v. 37A, Marth, pp. 559-566.
- [17] Borovikov V.P., Ivchenko G.I. Forecasting in the Statistica system in the Windows environment. Fundamentals of theory and intensive practice on a computer. Moscow: Finance and statistics. 2006. 368 p. (rus)
- [18] Egorova Yu.B., Uvarov V.N., Davydenko L.V., Davydenko R.A. Use of Industrial Monitoring Results for Predicting Mechanical Properties of Titanium Alloy Semiproducs. *Metal Science and Heat Treatment*. 2017. V. 59. №5-6. P. 377-383.
- [19] Yu. B. Egorova, S. V. Skvortsova, L. V. Davydenko, O. N. Gvozdeva Statistical comparison of mechanical properties of VT6 alloy bars with different structures // *Metallurgist*, Vol. 66, Nos. 7-8, November, 2022, p. 922-933. DOI 10.1007/s11015-022-01404-0
- [20] Brun M.Ya., Shakhanova G.V. On the structure of titanium alloys and the parameters that determine its diversity. *Metal Technology*, 2009, No. 4, pp. 41-47. (rus)
- [21] Yan Chong, Tilak Bhattacharjee, Nobuhiro Tsuji. Bi-lamellar microstructure in Ti–6Al–4V: Microstructure evolution and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 762, 5 August 2019, P. 138077. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138077>