



Экспериментальное обоснование двухкомпонентной статистической модели крупногабаритной поковки из титанового сплава



Х.Б. Киштыков

к.т.н., доцент
Кабардино-
Балкарского
государственного
университета
им. Х.М. Бербекова;
Кабардино-Балкарская
республика, г. Нальчик
e-mail:
hasim.1944@mail.ru

Аннотация. Статистическими испытаниями на усталость лабораторных образцов, вырезанных из поверхностной и внутренней зон поперечного сечения крупногабаритной поковки из титанового сплава, а также оценкой статической прочности и исследованием структурной макронеоднородности по длине поковки подтверждена ранее установленная двухкомпонентная статистическая модель крупногабаритной поковки. При этом первый компонент, как наиболее слабый (с крупным зерном), рассматривается как резерв повышения усталостной прочности за счет повышения степени укова и достижения равномерной мелкозернистой структуры.

Ключевые слова: титановый сплав, крупногабаритная поковка, лабораторные образцы, поверхностная зона, внутренняя зона, статическая прочность, структурная макронеоднородность, двухкомпонентная статистическая модель.

Исследования сопротивления усталости сталей [1–3] и титанового сплава типа ВТ-6 [4] на крупных образцах (диаметром порядка 60...150 мм) являются уникальными. Но испытания образцов больших размеров, кроме того, что являются нерентабельными, не дают характеристику неоднородности усталостных свойств крупногабаритных поковок. В связи с этим представляют научный и практический интерес оценка изменчивости усталостных свойств крупной поковки по статистическим испытаниям образцов малых размеров, а также оценка неоднородности крупногабаритных поковок в статистическом смысле. Здесь под статистической неоднородностью понимается различие статистик долговечностей

и пределов выносливости для малогабаритных образцов, вырезаемых из разных зон крупногабаритных поковок.

В данной работе для убедительного обоснования двухкомпонентной статистической модели крупногабаритной поковки из титанового сплава эксперименты, описанные в работе [5] и позволившие выявить значительную неоднородность усталостных свойств по длине крупногабаритной поковки, дополнены испытаниями на усталость образцов, вырезанных из поверхностной и внутренней зон поперечного сечения поковки, а также оценкой статической прочности и исследованием структурной макронеоднородности по длине поковки.

Для решения поставленных задач в наших исследованиях крупногабаритные поковки разрезались на темплеты длиной, соответствующей длине образцов. Каждый темплет предварительно размечался с последующей маркировкой каждого квадрата. Затем темплеты разрезались по разметке на призматические заготовки под образцы.

Рассмотрим оценку изменчивости усталостных свойств по поперечному сечению поковки из титанового сплава. Образцы вырезались из концевой участка поковки, имели диаметр 7,5 мм и пологую кольцевую канавку $R = 75$ мм. Обработка образцов – тонкое точение, так как шлифовка дает трещины [6], вид испытаний – переменный изгиб.

На рис. 1 в координатах $\sigma - \lg N$ представлены результаты испытаний этих образцов. Темными кружками даны результаты опытов на образцах, вырезанных из поверхностной зоны поковки (на расстоянии до 15...20 мм), светлыми – из внутренней. Такое разделение результатов опытов выполнено для выявления статистической неоднородности свойств по поперечному сечению крупногабаритной поковки. Соответствующие вероятности разрушения $P(\sigma)$ для $N = 10^7$ циклов и медианные значения $\lg N$ сравниваются в табл. 1 для уровней нагружения $\sigma = 540, 460$ и 400 МПа. В табл. 1 через m и m_r обозначены числа испытанных и разрушенных на уровне σ образцов, соответственно. Заметного различия для образцов, вырезанных из поверхностной

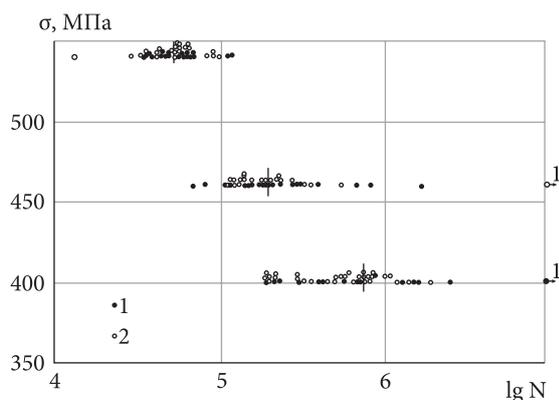


Рис. 1. Рассеивание характеристик сопротивления усталости для образцов, вырезанных из поверхностной (1) и внутренней (2) зон крупногабаритной поковки из титанового сплава

и внутренней зон поковки, не выявлено. К тому же результату приходим, сопоставляя распределения случайных значений долговечностей N для уровней $\sigma = 460$ и 400 МПа (рис. 2).

На рис. 2 точечные распределения $P(\lg N)$ даны на нормальной вероятностной бумаге. Точки $(P, \lg N)$ соответствуют значениям накопленной частоты (аналог интегрального распределения). Значения $P(\lg N_i)$ вычислялись так:

$$P(\lg N_i) = (i - 0,5)/m, \quad (1)$$

где i – порядковый номер случайного значения $\lg N$ в упорядоченном ряду долговечностей. Величина $P(\lg N)$, определенная по формуле (1), есть оценка вероятности того, что $\lg N \leq \lg N_i$.

Штриховыми линиями на рис. 2 представлены соответствующие нормальные распределения $P(\lg N)$, определенные по оценкам:

$$\overline{\lg N} = \frac{\sum_i^m \lg N_i}{m_r}; S(\lg N) = \sqrt{\frac{\sum_i^m (\lg N_i - \overline{\lg N})^2}{m_r - 1}}.$$

На нормальной вероятностной шкале эти распределения представляются прямыми. Эти прямые хорошо аппроксимируют опытные точки в границах $P \approx 1 \dots 95\%$, и в этом смысле допустимо определение доверительных интервалов для случая нормального распределения.

Для сравнения на указанных рисунках доверительные интервалы с надежностью 90% для выборки образцов из внутренней зоны показаны у точечного распределения $P(\lg N)$ для внешней зоны и наоборот. Видно взаимное попадание точечных распределений в указанные доверительные интервалы.

Таким образом, можно утверждать, что для титанового сплава с надежностью в 90% выборки образцов из поверхностных и внутренних зон поковки принадлежат одной генеральной совокупности. Поэтому в работе [5] для выявления статистической неоднородности усталостных свойств по длине крупногабаритной поковки использовались выборки, составленные из совокупности образцов, вырезанных из поверхностной и внутренней зон поковки.

Испытания на разрыв трех партий образцов, по 8...10 штук каждая, вырезанных из трехразных мест по длине поковки [5], показали средние значения пределов прочности $\overline{\sigma}_b$ (табл. 2), подтвердившие неоднородность и статических свойств по длине поковки. Так, для первой партии образцов, вырезанных из конца поковки $\overline{\sigma}_b = 659$ МПа, в то время как для второй и третьей партий, вырезанных из средних зон, $\overline{\sigma}_b$ почти не варьируется, составляя, соответственно, 735 МПа и 738 МПа. Для всех трех партий образцов предел прочности варьировался от 500 до 820 МПа при средней величине $\overline{\sigma}_b = 698$ МПа, подтверждая установленную в работе [5] изменчивость свойств по длине поковки из титанового сплава.

Характеристики сопротивления усталости по повреждению первой макротрещиной являются локальными и выражают изменчивость проч-

Таблица 1.

Сравнение вероятностей разрушения и медианных значений долговечностей для поверхностной и внутренней зон титановой поковки

σ , МПа	m_r	m	P , %	$\overline{\lg N}$	Зона поковки
540	22	22	100	$4,640 \leq 4,700 \leq 4,760$	поверхностная
	20	20	100	$4,650 \leq 4,720 \leq 4,790$	внутренняя
460	20	20	100	$5,270 \leq 5,348 \leq 5,426$	поверхностная
	19	20	95	$5,190 \leq 5,290 \leq 5,390$	внутренняя
400	19	20	95	$5,828 \leq 5,920 \leq 6,012$	поверхностная
	20	20	100	$5,633 \leq 5,773 \leq 5,913$	внутренняя

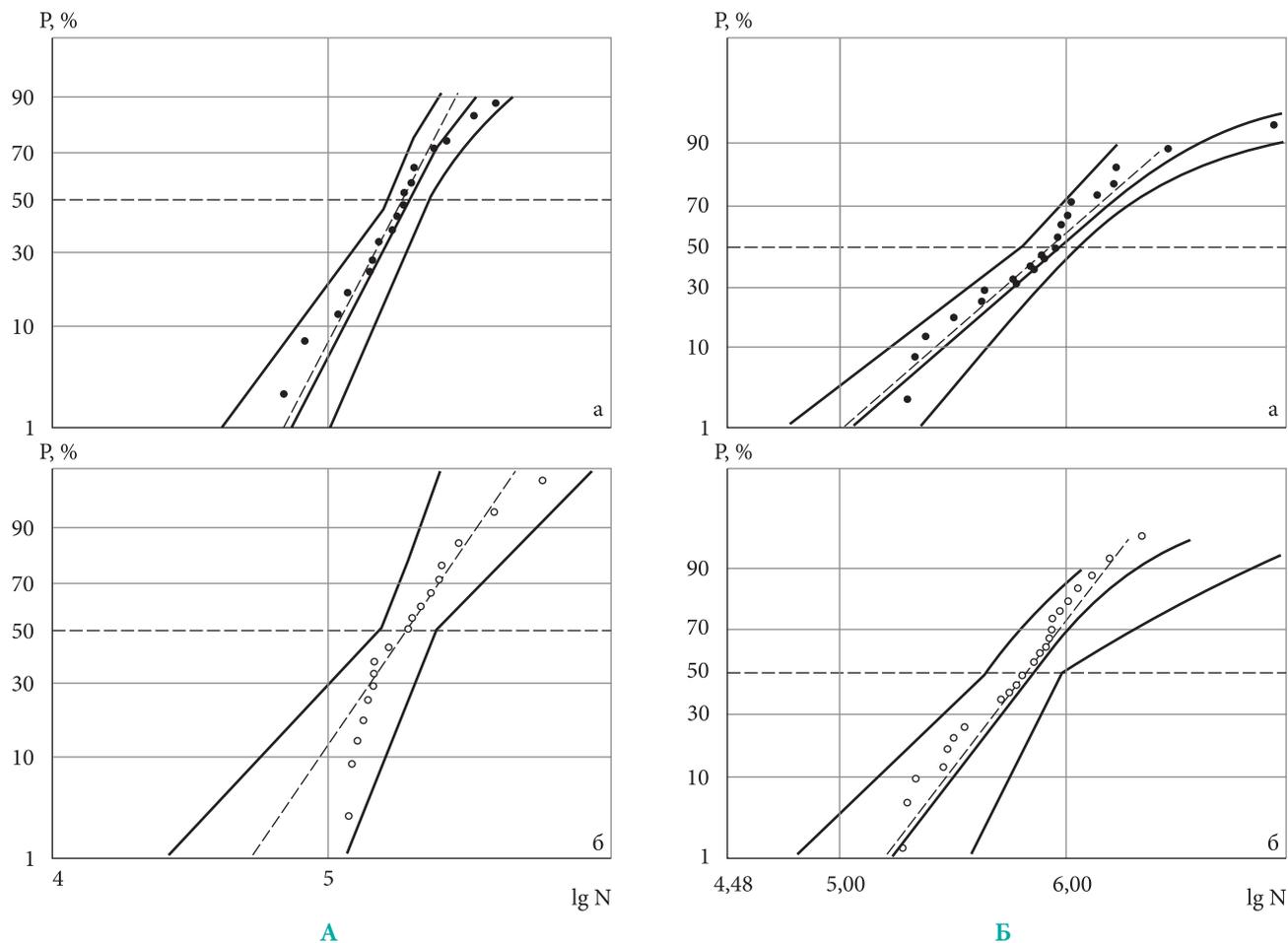


Рис. 2. Распределения долговечностей на уровнях $\sigma = 460$ МПа (А) и $\sigma = 400$ МПа (Б) для образцов, вырезанных из поверхностной (а) и внутренней (б) зон крупногабаритной поковки из титанового сплава; 90%-ные доверительные интервалы для внутренней (а) и поверхностной (б) зон

Таблица 2.

Сравнение вероятностей разрушения, медианных значений долговечностей, пределов выносливости и пределов прочности для различных зон по длине титановой поковки

σ , МПа	m_r	m	P , %	$\overline{\lg N}$	$\overline{\sigma_w}$, МПа	$\overline{\sigma_b}$, МПа	Зона поковки по длине	Номер партии
440	10	10	100	4,94	300	659	крайняя	1
400	10	10	100	5,37				
360	13	15	86,6	5,75				
440	10	10	100	5,90	386	735	средняя	2
400	17	20	85,0	6,43				
360	6	11	54,5	6,85				
440	18	20	90,0	6,11	395	738	средняя	3
400	8	8	100	6,46				
360	5	7	71,4	6,87				

ностных свойств весьма малых объемов материала, соизмеримых с двумя-тремя зёрнами сплава. Результаты испытаний на разрыв выражают некоторое осреднение прочности по всему ансамблю зёрен, входящих в образец.

Поэтому изменчивость свойств титанового сплава мы связали с его структурной макронеоднородностью. Из образцов, показавших отдельные и средние значения предела прочности, были изготовлены шлифы и исследовалась ма-

коструктура сплава (рис. 3). Установлено, что для крупногабаритной поковки из титанового сплава характерна крупнозернистая структура: размеры зерна варьируются в широких пределах от 0,08...0,1 мм до 0,5 мм и более (редко 2...3 мм). При этом зоны с более мелким зерном (рис. 3а) обеспечили наибольшее значение предела прочности $\sigma_b = 820$ МПа, тогда как с более крупным зерном (рис. 3б) – наименьшее $\sigma_b = 500$ МПа. Зоны с промежуточными величинами зерна показали значения σ_b , равные 760 МПа и 694 МПа (рис. 3в, г, соответственно).

Можно утверждать, что образцы с более мелким зерном, показавшие большие значения долговечностей и пределов выносливости, составляют прочный компонент и, наоборот, с более крупным зерном – слабый компонент.

Испытания смешанных выборок образцов дали бимодальные распределения характеристик сопротивления усталости, формальное разбиение которых на компоненты рассмотрено в работе [5].

Отметим, что Л.В. Морозов получение полимодальных распределений долговечностей образцов и деталей из жаропрочных сплавов при усталостных испытаниях связывал со сложными явлениями, происходящими на атомном уровне, со структурой и состоянием материала.

На получение бимодальных распределений при испытаниях на ударную вязкость стали в интервале температур $-140^{\circ}\dots+20^{\circ}$ указывали Крюссард (*Crussard*) и его коллеги [7, 8]. Причем,

связывали они это с различными механизмами разрушения: отрывом и сдвигом.

Связанная с установленной крупнозернистостью особенность титанового сплава, выразившаяся в двухстадийности процесса усталости для гладких образцов $N_r/N_t \approx 2$ [9], в то время как для таких же образцов из сталей долговечности разрушения и повреждения почти совпадают ($N_r \approx N_t$) [10], будет учитываться при разработке методики расчетной оценки вторичных распределений пределов выносливости.

Так как полученные здесь и в работе [5] результаты позволяют оценивать несущую способность крупногабаритных объектов техники, изготовленных из материалов с бимодальными распределениями характеристик сопротивления усталости лабораторных образцов, в условиях стационарного нагружения, то предложенную методику такой оценки рекомендуется внедрить в инженерную практику.

Для случая нерегулярного нагружения (однократные перегрузки) надежность работы указанных объектов определится уже с учетом полученных в этих работах особенностей: двухстадийности процесса усталости, вызванной крупнозернистой макроструктурой, и двухкомпонентной статистической модели крупногабаритной поковки из титанового сплава. Методические особенности учета указанных факторов будут рассмотрены в другой публикации, основанной на результатах работ [11, 12].

Литература

1. Зайцев Г.З., Пономарев В.Я. Сопротивление усталости стали и сварных соединений применительно к гидротурбинам. // Сб. ЦНИИТМаш, кн. 109. М.: Машиностроение, 1967. – С. 39–45.
2. Серенсен С.В., Когаев В.П., Бекш Т.А. Исследование сопротивления усталости металла натурной лопасти поворотнлопастной гидротурбины. // Вестник машиностроения. – 1959. – № 6. – С. 17–20.
3. Ouchida H. A Study of Size Effect on Fatigue Strength of Steel. Proc. of the Second Japan Congress on Testing Materials, 1959. – P. 14.
4. Кудрявцев И.В. и др. Влияние масштабного фактора и прессовой посадки на циклическую прочность неупрочненных и упрочненных обкаткой образцов из титанового сплава, легированного алюминием. // В кн.: Усталость металлов и сплавов. – М.: Наука, 1971. – С. 81–86.
5. Киштыков Х.Б. Вероятностно-детерминистская оценка сопротивления усталости круп-

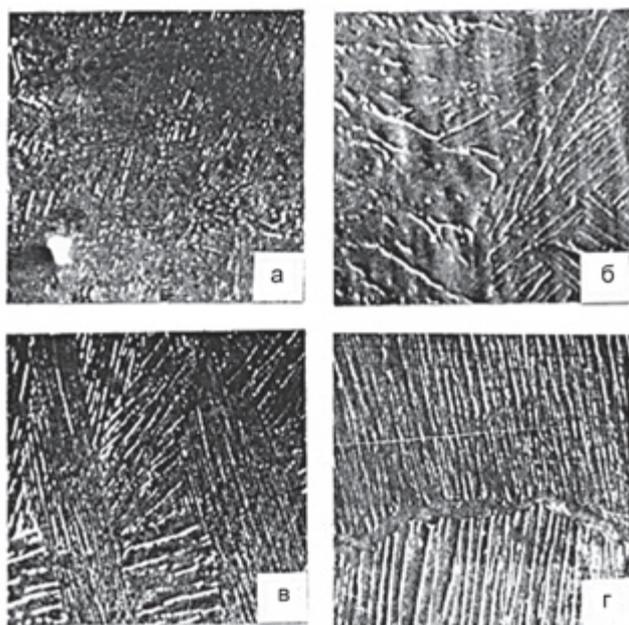


Рис. 3. Макроструктура различных зон по длине крупной поковки из титанового сплава, обеспечивших предел прочности на растяжение: а – 820 МПа; б – 500 МПа; в – 760 МПа; г – 694 МПа. Увеличение 190



ногабаритных объектов техники из титанового сплава. // *Качество. Инновации. Образование.* – 2015. – №7. – С. 40–46.

6. Киштыков Х.Б. Вероятностные исследования формы кривых усталости при регулярном нагружении и однократных перегрузках. // *Вестник КБГУ. Серия «Технические науки».* – Выпуск 3. – Нальчик: 1999. – С. 13–17.

7. Разрушение. Т.5. Расчет конструкций на хрупкую прочность / Пер. с англ. в 7-ми т. – М.: Машиностроение, 1977. – 464 с.

8. Хрупкие разрушения сварных конструкций / Пер. с англ. Под ред. И.В. Кудрявцева и Д.М. Шур. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

9. Киштыков Х.Б. Методические особенности планирования статистического эксперимента при усталостных испытаниях с однократной перегрузкой образцов из крупнозернистого титанового сплава. // *Сб.: Наука, техника и технология XXI века (НТТ-2009): Материалы IV Международной научно-технической конференции.* – Нальчик: КБГУ, 2009. – С. 202–210.

10. Вагапов Р.Д. Методика оценки усталостной прочности при разделении процесса циклического нагружения на две стадии. // *Заводская лаборатория.* – 1964. – № 6. – С. 733–738.

11. Киштыков Х.Б. Методика оценки вероятностного порога совпадения по форме вторичных кривых усталости с первичными и распределения минимального повреждающего напряжения. // *Известия Кабардино-Балкарского государственного университета.* – 2013. – Том III. – № 3. – С. 53–59.

12. Киштыков Х.Б. Прогнозирование остаточного ресурса машин при однократных перегрузках. // *Тяжелое машиностроение.* – 2006. – № 3. – С. 32–34.

Experimental justification of two-component statistical model of the large-size forging from titanic alloy

Kh.B. Kishtikov, candidate of technical sciences, associate professor, Kabardino-Balkarian State university named after H.M. Berbekov; Nalchik
e-mail: hasim.1944@mail.ru

Summary. By statistical tests for fatigue of the laboratory samples which are cut out from superficial and internal zones of cross section of a large-size forging from titanic alloy, and also by assessment of static durability and research of structural macroinhomogeneity on length of a forging have been confirmed earlier established two-component

statistical model of a large-size forging. At the same time the first component as the weakest (with large grain), is considered as a reserve of increase in fatigue durability due to increase in degree of an ukov and achievement of uniform fine-grained structure.

Keywords: titanic alloy, large-size forging, laboratory samples, superficial zone, internal zone, static durability, structural macroinhomogeneity, two-component statistical model.

References

1. Zaitsev G.Z., Ponomarev V.Ya. Resistance of fatigue of steel and welded connections in relation to water-wheels. *Collection of Central Research and Development Institute of technology of mechanical engineering, book 109. Mechanical engineering.* 1967. Moscow, pp. 39–45.

2. Serensen S.V., Kogaev V.P., Beksh T.A. Research of resistance of metal fatigue of the natural blade of the rotary bladed water-wheel. *Messenger of mechanical engineering.* 1959. No. 6. pp. 17–20.

3. Ouchida H.A. Study of Size Effect on Fatigue Strength of Steel. *Processing of the Second Japan Congress on Testing Materials.* 1959. p. 14.

4. Kudryavtsev I.V., Savvina N.M., Chechulin B.B., Yamshchikova A. I. Influence of a large-scale factor and press landing on cyclic durability of the samples which unstrengthened and strengthened by a running of samples from the titanic alloy alloyed by aluminum. *In the book: Fatigue of metals and alloys. Science.* 1971. Moscow, pp. 81–86.

5. Kishtikov Kh.B. Probabilistic and deterministic assessment of fatigue resistance of large-size objects of the equipment from titanic alloy. *Quality. Innovations. Education.* 2015. No. 7. pp. 40–46

6. Kishtikov Kh.B. Probabilistic researches of a form of curves of fatigue at regular loading and single overloads. *Bulletin of the Kabardino-Balkarian state university. Technical science series. Release 3.* 1999. Nalchik, pp. 13–17.

7. Destruction. Calculation of designs on fragile durability. *The translation from English in 7 volumes. Volume 5. Mechanical engineering.* 1977. Moscow, 464 p.

8. Kudryavtsev I.V., Shur D.M. Fragile destructions of welded designs. *Translation from English. Mechanical engineering.* 1974. Moscow, 320 p.

9. Kishtikov Kh.B. Methodical features of planning of a statistical experiment in case of fatigue testing with a single overload of samples from coarse-grained titanic alloy. *Collection: Science, equipment and technology of the 21st century (NTT-2009). Materials of the IV International scientific and technical conference. Kabardino-Balkarian state university.* 2009. Nalchik, pp. 202–210.

10. Vagapov R.D. A technique of assessment of fatigue durability at division of process of cyclic loading into two stages. *Factory laboratory.* 1964. No. 6. pp. 733–738.

11. Kishtikov Kh.B. A technique of assessment of a probabilistic threshold of coincidence in a form of secondary curves of fatigue with primary and distributions of the minimum damaging tension. *News of the Kabardino-Balkarian state university.* 2013. Volume 3, No. 3. pp. 53–59.

12. Kishtikov Kh.B. Forecasting of a residual resource of machines in case of single overloads. *Heavy engineering.* 2006. No. 3. pp. 32–34.