
Научная статья

УДК 621.763

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-141-152

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОДНОФАКТОРНОГО ДИСПЕРСИОННОГО АНАЛИЗА

Н.Ю. Подживотов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Применение метода однофакторного дисперсионного анализа рассматривается на примере оценки результатов механических испытаний металлического конструкционного материала (алюминиевый сплав). Дисперсионный анализ предлагается использовать как простой, но эффективный метод оперативной оценки и/или контроля уровней свойств материалов по результатам физико-механических испытаний, а также для оценки и контроля однородности и стабильности экспериментальных данных, полученных при проведении круговых межлабораторных или квалификационных испытаний.

Ключевые слова: однофакторный дисперсионный анализ, физико-механические испытания, оценка характеристик материалов, уровни свойств, статистический анализ, проверка квалификации

Для цитирования: Подживотов Н.Ю. Оценка результатов испытаний с помощью однофакторного дисперсионного анализа // Труды ВИАМ. 2022. № 8 (114). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-141-152.

Scientific article

ASSESSMENT OF RESULTS BY MEANS OF THE ANALYSIS OF VARIANCE METHOD

N.Yu. Podzhivotov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The application of the method of single-factor analysis of variance is considered on the example of evaluating the results of mechanical tests of a metallic structural material (aluminum alloy). Analysis of variance is proposed to be used as a simple but effective method for the rapid assessment and/or control of the levels of material properties based on the results of physical and mechanical tests, as well as for the assessment and control of the uniformity and stability of experimental data obtained during circular interlaboratory or qualification tests.

Keywords: one-factor dispersion analysis, the analysis of variance method, assessment of characteristics of materials, levels of properties, statistical analysis, skill test

For citation: Podzhivotov N.Yu. Assessment of results by means of the analysis of variance method. *Trudy VIAM*, 2022, no. 8 (114), paper no. 12. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-8-141-152.

Введение

Объективная оценка уровней свойств конструкционных материалов, в том числе материалов нового поколения, была и остается одной из приоритетных задач современного материаловедения, особенно в области самолето- и вертолетостроения [1, 2].

В последние десятилетия в России и за рубежом активно развивается компьютерное 3D-моделирование авиационных конструкций. При этом цифровое проектирование и конечно-элементные расчеты на прочность и долговечность авиационных конструкций с помощью различных CAD/CAM систем по-прежнему основываются на реальных экспериментальных данных и результатах статистического анализа физико-механических испытаний образцов материалов и конструктивно-подобных элементов.

Существующих справочных значений характеристик прочности конструкционных материалов, используемых при проектировании и проведении расчетов на прочность, как правило, оказывается недостаточно, поскольку требуется дополнительная обязательная верификация уровней свойств по результатам испытаний образцов применяемых полуфабрикатов. Кроме того, по мере накопления достаточного и представительного объема экспериментальных данных, справочные значения на постоянной основе должны актуализироваться и при необходимости корректироваться по результатам реальных физико-механических испытаний образцов, изготовленных из полуфабрикатов заданного типоразмера [3].

При этом накопление экспериментальных данных и численная оценка характеристик должны проводиться на всех этапах жизненного цикла материала – например, при приемосдаточных испытаниях, проводимых на этапах производства и поставки полуфабрикатов. Для контроля качества и стабильности свойств материалов на производстве на образцах проводится выходной, а затем заказчиком – входной контроль заявленных уровней свойств материала, т. е. проводятся физико-механические испытания серий образцов и последующий сравнительный анализ полученных экспериментальных данных. Уровни характеристик статической прочности конструкционных материалов оцениваются, например, по результатам испытаний на растяжение стандартных образцов [4, 5].

Очевидно, что для корректных расчетов на прочность, выполняемых при проектировании авиационных конструкций, должны быть использованы статистически обоснованные значения, актуальные базы данных и справочники уровней свойств авиационных материалов, сформированные по результатам достаточно большого объема физико-механических испытаний образцов материалов [6, 7].

Испытания для получения объективной оценки уровня свойств материалов, как правило, проводятся на представительных выборках большого объема или на нескольких сериях образцов. Например, проведение испытаний нескольких серий образцов может быть обусловлено необходимостью получения обобщенной оценки уровня свойств одновременно по нескольким партиям материала, изготовленным одним или несколькими производителями полуфабрикатов и т. д. [8–10].

Серии образцов металлических материалов для испытаний могут быть сформированы из различных плавок, полуфабрикатов или из полуфабрикатов одного типа, но отличающихся геометрическими размерами (например, листы или плиты различной толщины), заводом-изготовителем, режимом термообработки и т. д. В некоторых случаях – например, при формировании баз данных, при составлении или дополнении справочников по свойствам материалов, при проведении квалификационных, круговых или межлабораторных сличительных испытаний, для

анализа и получения объективных оценок уровней свойств – также используется ряд независимых выборок экспериментальных данных и результаты испытаний, полученные на нескольких сериях образцов материала. Например, при круговых испытаниях серии представляют собой наборы идентичных образцов, как правило, равного объема. При межлабораторных сличительных испытаниях серии (наборы) образцов испытываются в лабораториях с целью проверки квалификации участников испытаний.

В результате испытаний нескольких серий стандартных образцов формируются самостоятельные выборки экспериментальных значений. В зависимости от целей и задач исследования объемы выборок полученных экспериментальных значений могут быть равными, но иногда могут существенно отличаться [11, 12]. Как отмечалось в работах [13, 14], независимо от вида и целей проведения испытаний, а также от объема экспериментальных данных (выборок) и количества серий образцов, в результате последующего статистического анализа экспериментальных данных должны быть получены корректные, обоснованные и объективные оценки уровней свойств материала с вероятностью не менее заданного уровня – например, 95 или 99 %.

Одним из методов получения объективной оценки уровня свойств материалов является дисперсионный анализ. Например, однофакторный дисперсионный анализ применяется в случае, когда проводятся испытания нескольких серий образцов, в результате которых необходимо оценить не только обобщенный уровень свойств физико-механических характеристик, но и провести сравнение экспериментальных данных, полученных на разных сериях, или оценить влияние на уровень свойств одного из наиболее значимых факторов.

Материалы и методы

Дисперсионный анализ является одним из наиболее простых, но при этом эффективных методов анализа однородности нескольких выборок или серий экспериментальных данных. Постановка задачи при дисперсионном анализе основана на оценке однородности экспериментальных данных по их средним значениям. В зависимости от поставленной задачи анализ может проводиться по одному фактору (однофакторный анализ) или одновременно по двум и более факторам (двух- или многофакторный анализ).

В общем случае на численный результат эксперимента и уровень свойств той или иной характеристики при физико-механических испытаниях одновременно влияет ряд факторов, которые условно можно разделить на две группы: контролируемые и неконтролируемые. К контролируемым факторам относятся, например, такие как задаваемый уровень нагрузки при испытаниях, температура испытаний, номинальные геометрические размеры образцов, химический состав материала, заданный диапазоном технических условий, а для композиционных материалов – направление армирования, количество, состав и/или толщина слоев и т. д. [15]. К неконтролируемым или случайным факторам, оказывающим влияние на результаты испытаний и уровень свойств материала по отдельности или в совокупности, относятся в первую очередь погрешность и разброс фактических значений самих контролируемых факторов, случайная структурная неоднородность материалов на макроуровне, а также другие, в том числе неизвестные, случайные факторы [16, 17].

Если уровень контролируемых факторов и их влияние на результат испытаний для заданного уровня значимости можно считать определенными, то влияние неконтролируемых факторов, а также совместное влияние двух групп факторов заранее

неизвестно. Наличие случайных факторов может оказывать существенное влияние на полученные оценки уровней свойств, на интерпретацию результатов испытаний, может приводить к большому разбросу значений оцениваемых характеристик, к искажению устанавливаемых зависимостей между контролируемыми факторами и результатами испытаний, т. е. исследуемыми признаками.

Последовательность реализации однофакторного дисперсионного анализа для независимых выборок экспериментальных данных представляет собой ряд несложных вычислений, предложенных в 1925 г. Р.А. Фишером. Рассмотрим однофакторный дисперсионный анализ на примере предварительной экспресс-оценки экспериментальных данных, полученных при круговых или квалификационных испытаниях. Однофакторный дисперсионный анализ можно использовать как наиболее простой и понятный метод проверки результатов сравнительного анализа.

Количество образцов при проведении круговых или межлабораторных испытаний, как правило, одинаково для каждого участника. Очевидно, что объем серий будет зависеть от вида испытаний – например, при статических и усталостных испытаниях количество образцов будет отличаться, но у каждого из участников будет одно и то же количество образцов. Исключение будет в случае, если кому-либо из участников межлабораторных сличительных испытаний требуется испытать несколько наборов образцов, но и в этом случае результаты испытаний каждого дополнительного набора будут рассматриваться при анализе самостоятельно, без объединения, т. е. как результаты, полученные отдельным участником.

Пусть в качестве фактора будет выступать участник, например, круговых или квалификационных испытаний. Тогда в качестве уровней оцениваемого фактора будут использоваться результаты испытаний всех участвующих лабораторий. Каждый из участников испытывает по n образцов. В результате физико-механических испытаний, выполненных каждым участником испытаний, сформирована выборка значений количественной характеристики X . Все образцы для испытаний, распределяемые между участниками, изготавливаются одновременно из одних и тех же плавок, партий и полуфабрикатов. Допустим, что распределения экспериментальных значений характеристики X принадлежат нормальному закону распределения. Соответствие нормальному закону распределения может быть проверено с помощью одного или, при необходимости, одновременно нескольких известных критериев согласия – например, с помощью критерия Колмагорова–Смирнова и др. [18]. Кроме того, поскольку образцы распределялись между участниками из одной партии, то примем допущение, что экспериментальные значения характеристики X , полученные всеми участниками на данных образцах, принадлежат одной генеральной совокупности.

Задача однофакторного дисперсионного анализа в рассматриваемом случае состоит в проверке гипотезы о равенстве групповых средних значений, т. е. о равенстве средних значений оцениваемой характеристики для каждого участника испытаний. Другими словами, проверяется гипотеза о взаимном соответствии по средним значениям оцениваемой характеристики результатов испытаний всех участников квалификационных или круговых испытаний.

Результаты испытаний всех участников по рассматриваемой (оцениваемой) характеристике X представлены в виде табл. 1, где L_j ($j = 1, \dots, p$) – порядковый номер лаборатории, участвующей в проведении испытаний; p – общее количество участников; g – общее количество экспериментальных значений характеристики X (одинаковое для всех участников), полученных каждым участником испытаний, или объем серии образцов, переданной каждому участнику.

Таблица 1

Результаты испытаний лабораторий-участников по рассматриваемой (оцениваемой) характеристике $X (i = 1, \dots, g; j = 1, \dots, p)$

Условный номер образца (i)	Значения, полученные лабораториями-участниками (j)			
	L_1	L_2	L_j	L_p
1	x_{11}	x_{12}	x_{1j}	x_{1p}
2	x_{21}	x_{22}	x_{2j}	x_{2p}
...
g	x_{g1}	x_{g2}	x_{gj}	x_{gp}
Групповое среднее значение	$\bar{x}_{гp1}$	$\bar{x}_{гp2}$	$\bar{x}_{гpj}$	$\bar{x}_{гpp}$

Для оценки равенства групповых средних значений при однофакторном дисперсионном анализе необходимо определить:

– общую сумму квадратов отклонений экспериментальных значений характеристики X от общего среднего значения:

$$S_{\text{общ}} = \sum_{j=1}^p \sum_{i=1}^g (x_{ij} - \bar{x})^2 \text{ или} \quad (1)$$

$$S_{\text{общ}} = \sum_{j=1}^p P_j - \frac{[\sum_{j=1}^p R_j]^2}{pg}, \quad (2)$$

где $P_j = \sum_{i=1}^g x_{ij}^2$ – сумма квадратов наблюдаемых значений оцениваемой характеристики, полученных лабораториями-участниками при проведении испытаний; $R_j = \sum_{i=1}^g x_{ij}$ – сумма наблюдаемых значений оцениваемой характеристики j -й лаборатории при проведении испытаний;

– факторную сумму квадратов отклонений групповых средних значений от общего среднего значения в качестве характеристики разброса значений между участниками (межгрупповое рассеяние):

$$S_{\text{факт}} = g \sum_{j=1}^p (\bar{x}_{гpj} - \bar{x})^2 \text{ или} \quad (3)$$

$$S_{\text{факт}} = \sum_{j=1}^p \frac{R_j^2}{g} - \frac{[\sum_{j=1}^p R_j]^2}{pg}; \quad (4)$$

– остаточную сумму квадратов отклонений значений группы (участника) от своих групповых средних значений в качестве характеристики внутригруппового рассеяния:

$$S_{\text{ост}} = \sum_{i=1}^g (x_{i1} - \bar{x}_{гp1})^2 + \sum_{i=1}^g (x_{i2} - \bar{x}_{гp2})^2 + \dots + \sum_{i=1}^g (x_{ip} - \bar{x}_{гpp})^2 \quad (5)$$

или при этом, поскольку $S_{\text{ост}} = S_{\text{общ}} - S_{\text{факт}}$, имеем

$$S_{\text{ост}} = \sum_{j=1}^p P_j - \frac{[\sum_{j=1}^p R_j]^2}{pg} - \left[\sum_{j=1}^p \frac{P_j^2}{g} - \frac{[\sum_{j=1}^p R_j]^2}{pg} \right]. \quad (6)$$

По аналогии с суммой квадратов отклонений экспериментальных значений общий разброс (дисперсия $S_{\text{общ}}^2$) экспериментальных значений оцениваемой

характеристики материала для каждого участника испытаний по результатам физико-механических испытаний можно представить в виде суммы двух дисперсий:

$$S_{\text{общ}}^2 = S_{\text{факт}}^2 + S_{\text{ост}}^2 \quad (7)$$

или, поскольку в первую очередь необходимо оценить долю дисперсии, обусловленную влиянием изменчивости случайных факторов на результаты испытаний между лабораториями-участниками, имеем

$$S_{\text{ост}}^2 = S_{\text{общ}}^2 - S_{\text{факт}}^2, \quad (8)$$

где $S_{\text{факт}}^2$ – дисперсия, обусловленная влиянием одного или нескольких контролируемых факторов; $S_{\text{ост}}^2$ – дисперсия, обусловленная влиянием случайных, неконтролируемых факторов.

Для вычисления факторной и остаточной дисперсий, факторную и остаточную суммы необходимо разделить на соответствующие числа степеней свободы:

$$S_{\text{факт}}^2 = \frac{S_{\text{факт}}}{p-1}; \quad S_{\text{ост}}^2 = \frac{S_{\text{ост}}}{g(p-1)}. \quad (9)$$

Далее для проверки принятой гипотезы о равенстве групповых средних значений применяют критерий Фишера–Снедекора, в соответствии с которым наблюдаемое значение определяют из соотношения

$$F_{\text{набл}} = \frac{S_{\text{факт}}^2}{S_{\text{ост}}^2}. \quad (10)$$

Величина $F_{\text{кр}}$ – справочная величина, которая определяется из таблицы критических значений распределения Фишера для заданного числа степеней свободы (объема испытаний, количества участвующих лабораторий) и уровня значимости [18].

Если $F_{\text{набл}} < F_{\text{кр}}$ – различия межгрупповых средних значений считаются незначительными, а в случае, если $F_{\text{набл}} > F_{\text{кр}}$ – различия межгрупповых средних значений являются значимыми.

В работе [19] указывается, что если факторная дисперсия окажется меньше остаточной, то уже непосредственно из этого следует справедливость принятой гипотезы о равенстве средних значений, поэтому дальнейшие вычисления (сравнение дисперсий с помощью критерия Фишера) излишни.

Однофакторный дисперсионный анализ позволяет с заданной вероятностью достаточно оперативно оценить результаты испытаний участвующих лабораторий и по полученным оценкам экспериментальных значений выбранной характеристики оценить качество проведения испытаний участниками.

Оперативность такого подхода применительно к оценке (проверке) результатов испытаний по той или иной характеристике обусловлена возможностью простой и доступной реализации метода однофакторного дисперсионного анализа, например, с помощью программы MS Excel.

Выбор той или иной характеристики, по которой проводится анализ, осуществляется на основании результатов испытаний и полученных экспериментальных данных. Но необходимо отметить, что в качестве отличительного признака (или признаков) при анализе результатов механических испытаний металлических материалов может также являться не лаборатория-участник испытаний, а, например, уровень значений одной из характеристик прочности или упругости, а фактором – фактическое (случайное) процентное содержание легирующего элемента сплава, или при многофакторном анализе такими случайными факторами могут

служить фактические значения процентного содержания основных элементов химического состава сплава, представленные сериями (плавками) образцов.

В некоторых случаях относительно простая задача проведения однофакторного дисперсионного анализа усложняется тем, что при оценке результатов механических испытаний материалов исследователю необходимо априорно, но при этом обоснованно, выбрать наиболее весомый, значимый фактор и уже по одному выбранному фактору провести сравнительный анализ. Задача обоснования выбора фактора актуальна в случае, когда для сокращения или оптимизации времени статистической обработки данных (не в ущерб объективности результатов анализа) требуется провести именно однофакторный дисперсионный анализ и из множества факторов, влияющих на результат, выбрать только один, оказывающий наибольшее определяющее влияние.

В общем случае, если в результате предварительного анализа выявлено, что одновременно несколько факторов являются равнозначными по своему влиянию на оцениваемый результат (или таковым будет совместное влияние факторов), то все эти факторы должны быть учтены при обязательном многофакторном анализе, проведение которого будет обосновано. В результате предварительного анализа при необходимости может быть показана доля влияния (значимость) на оценку характеристик каждого отдельного фактора. В таком случае перед проведением дисперсионного анализа результатов механических испытаний материалов необходимо решить задачу по обоснованному выбору минимального числа факторов (например, одного), имеющих наиболее значимое влияние на оценку результатов данного исследования.

Рассмотрим применение однофакторного дисперсионного анализа на примере сравнительной оценки результатов круговых межлабораторных испытаний на растяжение стандартных образцов типового полуфабриката (лист) конструкционного алюминиевого сплава (табл. 2). В качестве характеристики X в рассматриваемом примере выберем предел прочности при растяжении – одну из основных характеристик конструкционного материала. Пусть в круговых испытаниях принимали участие пять различных лабораторий ($p = 5$) и каждая лаборатория испытывала серию из 10 стандартных образцов ($g = 10$).

Таблица 2

Результаты испытаний на растяжение

Условный номер образца ($i = 1, \dots, 10$)	Значения предела прочности при растяжении σ_b , МПа, полученные j -м участником ($j = 1, \dots, 5$)				
	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
1	465	460	470	465	445
2	470	460	470	465	420
3	470	460	465	465	395
4	465	460	470	465	395
5	470	460	465	465	440
6	455	445	455	450	410
7	460	445	455	455	395
8	460	445	455	450	435
9	455	445	455	450	445
10	460	445	455	455	395
Групповое среднее значение	464	454	463	460	418

Для оценки равенства групповых средних значений в первую очередь определяем суммы квадратов наблюдаемых значений оцениваемой характеристики, полученных лабораториями-участниками при проведении испытаний:

$$P_1 = 2148625, P_2 = 2061700, P_3 = 2144150, P_4 = 2111875, P_5 = 1747475,$$

и суммы наблюдаемых значений оцениваемой характеристики j -й лаборатории при проведении испытаний:

$$P_1 = 4635, P_2 = 4540, P_3 = 4630, P_4 = 4595, P_5 = 4175$$

и в соответствии с уравнением (2) определяем общую сумму квадратов отклонений экспериментальных значений предела прочности от общего среднего значения:

$$S_{\text{общ}} = 10213825 - (22575)^2/50 = 21213.$$

Далее в соответствии с выражением (4) определяем факторную сумму квадратов отклонений групповых средних значений от общего среднего значения в качестве характеристики разброса значений между участниками (межгрупповое рассеяние):

$$S_{\text{факт}} = 10207638 - (22575)^2/50 = 15025.$$

Затем находим остаточную сумму квадратов отклонений значений участника от своего группового среднего значения в качестве характеристики внутригруппового рассеяния:

$$S_{\text{ост}} = 21213 - 15025 = 6188.$$

На следующем этапе с помощью выражений (9) вычисляем факторную и остаточную дисперсии:

$$S_{\text{факт}}^2 = \frac{15025}{4} = 3756; S_{\text{ост}}^2 = \frac{6188}{40} = 155.$$

Далее из соотношения (10) определяем $F_{\text{набл}}$:

$$F_{\text{набл}} = \frac{3756}{155} = 24,3.$$

Критическое значение распределения Фишера для заданного числа степеней свободы (объема испытаний $g = 10$, количества участвующих лабораторий $p = 5$) и уровня значимости $\alpha = 0,01$ в соответствии с работой [10] равно $F_{\text{кр}} = 3,83$.

Поскольку в данном примере $F_{\text{набл}} > F_{\text{кр}}$, то различия межгрупповых средних значений предела прочности, полученных участниками круговых испытаний, являются значимыми, т. е. с вероятностью 99 % результаты испытаний одного или нескольких участников являются сомнительными или рассматриваемые результаты испытаний (экспериментальные значения предела прочности алюминиевого сплава) не являются однородными.

При исключении из анализа данных участника L_5 , которые являются причиной неоднородности в рассматриваемом примере, получаем

$$F_{\text{набл}} = \frac{192}{59} = 3,2 \text{ и } F_{\text{кр}} = 4,51,$$

т. е. $F_{\text{набл}} < F_{\text{кр}}$, следовательно, различия между групповыми средними значениями оставшихся четырех участников с вероятностью 99 % являются незначительными.

Для данного примера уже по групповым средним значениям экспериментальных данных видно, что результаты испытаний участника под номером 5 существенно отличаются от остальных результатов, но на практике (при большом количестве участников) при неочевидных отличиях между средними значениями сложно сразу и объективно определить результаты какого (каких) из участников являются причиной

такой неоднородности. Кроме того, еще сложнее объективно оценить однородность экспериментальных данных по значениям их групповых дисперсий или одновременно по значениям дисперсий и среднему значению.

В общем случае, когда сомнительные результаты участника неочевидны, достаточно повторять несложный расчет дисперсионного анализа с последовательным исключением одного из участников до тех пор, пока рассматриваемая совокупность данных не станет однородной с заданной вероятностью. Если из общей совокупности последовательно исключены несколько участников, следующим шагом является проверка гипотезы о возможности объединения, т. е. однородности экспериментальных данных для совокупности данных, исключенных участников, факторов и т. д. В случае если ряд исключенных из общей совокупности участников (данных) является однородным между собой, то целесообразно провести дополнительный анализ (например, с помощью регрессионного анализа) по выявлению причин или отличительных признаков этих данных от общей совокупности.

Таким образом, применяя метод дисперсионного анализа с помощью последовательной группировки факторов по принципу их однородности (по дисперсии и среднему значению), с заданной вероятностью можно проводить контроль экспериментальных данных и в итоге по результатам испытаний получать объективную оценку характеристик материалов.

Заключения

Основной задачей при проведении любых испытаний является получение объективной оценки исследуемых характеристик, в том числе и уровней свойств материала (полуфабриката). Поскольку испытания в большинстве случаев проводятся на нескольких сериях образцов, то для получения объективной оценки результатов испытаний необходимо применять эффективные методы анализа независимых совокупностей (групп) экспериментальных данных.

Дисперсионный анализ является одним из простых методов статистической оценки экспериментальных данных, полученных в результате испытаний отдельных серий образцов. При этом серии образцов металлических материалов для испытаний могут быть сформированы, например, из различных плавок, полуфабрикатов или из полуфабрикатов одного типа, но отличающихся геометрическими размерами (например, листы или плиты различной толщины), заводом-изготовителем, режимом термообработки и т. д.

Однофакторный дисперсионный анализ может быть применен в случае, когда проводятся испытания нескольких серий образцов, в результате которых необходимо оценить не только обобщенные оценки уровней свойств физико-механических характеристик, но и провести сравнение экспериментальных данных, полученных в разных лабораториях – например, при круговых испытаниях, или оценить влияние на уровень свойств одного из наиболее значимых факторов.

Рассмотренный в данной статье пример применения дисперсионного анализа по оценке результатов испытаний на растяжение идентичных образцов алюминиевого сплава, проведенных несколькими лабораториями, показывает, что с помощью последовательной группировки факторов по принципу их однородности (по дисперсии и среднему значению) с заданной вероятностью можно проводить объективный контроль экспериментальных данных, а наряду с применением известных статистических критериев (например, с помощью критерия Граббса) исключать из дальнейшего анализа и расчетов сомнительные результаты и в итоге обеспечивать получение объективной оценки характеристик материалов и повышение точности расчетов на прочность.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. О необходимости создания единого информационно-аналитического центра авиационных материалов РФ // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2019. № 3. С. 28–34.
3. Каблов Е.Н., Гриневич А.В., Ерасов В.С. Характеристики прочности металлических авиационных материалов и их расчетные значения // *75 лет. Авиационные материалы*. М.: ВИАМ, 2007. С. 370–379.
4. Митраков О.В., Яковлев Н.О., Якушева Н.А., Гриневич А.В. Особенности разрушения стали 20ХГСН2МФА-ВД при испытании на вязкость разрушения // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 49–56. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-49-56.
5. Димитриенко Ю.И., Губарева Е.А., Сборщиков С.В., Ерасов В.С., Яковлев Н.О. Численное моделирование и экспериментальное исследование деформирования упругопластических пластин при смятии // *Математическое моделирование и численные методы*. 2015. № 1 (5). С. 67–82.
6. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Ястребов А.С. Прогнозирование прочностных и деформационных характеристик материалов при испытаниях на растяжение и ползучесть // *Материаловедение*. 2019. № 2. С. 3–8.
7. Яковлев Н.О., Ерасов В.С., Петрова А.П. Сравнение нормативных баз различных стран по испытанию клеевых соединений материалов // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2014. № 7. С. 2–8.
8. Гриневич А.В., Лаптев А.Б., Скрипачев С.Ю., Нужный Г.А. Матрица прочностных характеристик для оценки предельных состояний конструкционных металлических материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-67-74.
9. Гриневич Д.В., Яковлев Н.О., Славин А.В. Критерии разрушения полимерных композиционных материалов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2019. № 7 (79). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.
10. Яковлев Н.О., Гуляев А.И., Крылов В.Д., Шуртаков С.В. Микроструктура и свойства конструкционных композиционных материалов при испытании на статическую межслоевую трещиностойкость // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2016. № 1 (19). Ст. 09. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 07.02.2022).
11. Махсидов В.В., Яковлев Н.О., Ильичев А.В. и др. Определение деформации материала конструкции из ПКМ с помощью интегрированных оптоволоконных сенсоров // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2016. Т. 22. № 3. С. 402–413.
12. Яковлев Н.О., Гриневич Д.В., Мазалов П.Б. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при сжатии сетчатой конструкции, синтезированной методом селективного лазерного сплавления // *Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки*. 2018. № 6 (81). С. 113–127.
13. Подживотов Н.Ю. Экспресс-метод сравнительной оценки уровней свойств материалов // *Труды ВИАМ*. 2019. № 10 (82). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.02.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-111-124.
14. Подживотов Н.Ю. Об оптимизации подхода к обоснованию минимального объема испытаний авиационных конструкционных материалов // *Все материалы*. Энциклопедический справочник. 2021. № 1. С. 28–35.
15. Коновалов В.В., Дубинский С.В., Макаров А.Д., Доценко А.М. Исследование корреляционных зависимостей между механическими свойствами авиационных материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-40-46.

16. Ерасов В.С., Автаев В.В., Орешко Е.И., Яковлев Н.О. Преимущества «жесткого» нагружения при испытаниях на статическое и повторно-статическое растяжение // Труды ВИАМ. 2018. № 9 (69). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-92-104.
17. Пачурин Г.В., Гушин А.Н., Галкин В.В., Пачурин В.Г. Теоретические основы повышения эксплуатационной долговечности штампованных металлоизделий: учеб. пособие. Н. Новгород: НГТУ, 2006. 176 с.
18. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.
19. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: учеб. пособие для студентов вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1979. 400 с.

References

1. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
2. Kablov E.N., Podzhivotov N.Yu., Lutsenko A.N. On the need to create a unified information and analytical center for aviation materials of the Russian Federation. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*, 2019, no. 3, pp. 28–34.
3. Kablov E.N., Grinevich A.V., Erasov V.S. Characteristics of the strength of metallic aviation materials and their calculated values. *75 years. Aviation materials*. Moscow: VIAM, 2007, pp. 370–379.
4. Mitrakov O.V., Yakovlev N.O., Yakusheva N.A., Grinevich A.V. Destruction features of steel 20ХГСН2МФА-ВД during the fracture toughness test. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 49–56. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-49-56.
5. Dimitrienko Yu.I., Gubareva E.A., Sborshchikov S.V., Erasov V.S., Yakovlev N.O. Numerical modeling and experimental study of deformation of elastoplastic plates under collapse. *Matematicheskoye modelirovaniye i chislennyye metody*, 2015, no. 1 (5), pp. 67–82.
6. Oreshko E.I., Erasov V.S., Yastrebov A.S. Prediction of strength and deformation characteristics of materials during tensile and creep tests. *Materialovedenie*, 2019, no. 2, pp. 3–8.
7. Yakovlev N.O., Erasov V.S., Petrova A.P. Comparison of the normative bases of various countries for testing adhesive joints of materials. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2014, no. 7, pp. 2–8.
8. Grinevich A.V., Laptev A.B., Skripachev S.Yu., Nuzhnyj G.A. Matrix strength characteristics for the assessment of limit states of structural metallic materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 67–74. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-67-74.
9. Grinevich D.V., Yakovlev N.O., Slavin A.V. The criteria of the failure of polymer matrix composites (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 11. Available at: <http://viam-works.ru> (accessed: February 25, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-92-111.
10. Yakovlev N.O., Gulyaev A.I., Krylov V.D., Shurtakov S.V. Microstructure and properties of structural composite materials during testing for static interlayer crack resistance. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika*, 2016, no. 1 (19), paper no. 09. Available at: <http://www.materialsnews.ru> (accessed: February 7, 2022).
11. Makhsidov V.V., Yakovlev N.O., Ilichev A.V. et al. Determination of the deformation of the material of a PCM structure using integrated fiber-optic sensors. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii*, 2016, vol. 22, no. 3, pp. 402–413.
12. Yakovlev N.O., Grinevich D.V., Mazalov P.B. Mathematical modeling of the stress-strain state in compression of a mesh structure synthesized by the method of selective laser fusion. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman*. Ser.: Natural sciences, 2018, no. 6 (81), pp. 113–127.
13. Podzhivotov N.Yu. Express method of a comparative assessment properties levels of materials. *Trudy VIAM*, 2019, no. 10 (82), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 25, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-10-111-124.

14. Podzhivotov N.Yu. On the optimization of the approach to substantiation of the minimum volume of testing of aviation structural materials. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2021, no. 1, pp. 28–35.
15. Konovalov V.V., Dubinskiy S.V., Makarov A.D., Dotsenko A.M. Research of correlation dependencies between mechanical properties of aviation materials. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 40–46. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-40-46.
16. Erasov V.S., Avtaev V.V., Oreshko E.I., Yakovlev N.O. Strain-controlled testing advantages at static tension and repeated-static tension. *Trudy VIAM*, 2018, no. 9 (69), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 25, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-92-104.
17. Pachurin G.V., Gushchin A.N., Galkin V.V., Pachurin V.G. *Theoretical foundations for increasing the operational durability of stamped metal products*: textbook. Nizhny Novgorod: NSTU, 2006, 176 p.
18. Stepnov M.N. *Statistical methods for processing the results of mechanical tests*: a reference book. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 232 p.
19. Gmurman V.E. *Guide to solving problems in probability theory and mathematical statistics*: textbook for students of higher educational institutions. 3rd ed., rev. and add. Moscow: Vysshaya shkola, 1979, 400 p.

Информация об авторах

Подживотов Николай Юрьевич, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Nikolay Yu. Podzhivotov, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 24.05.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 25.05.2022.

The article was submitted 24.05.2022; approved and accepted for publication after reviewing 25.05.2022.