

На правах рукописи



Абдуллин Марат Равильевич

**СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 01.02.04

«Механика деформируемого твердого тела»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2015

Работа выполнена в институте машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Березин Александр Васильевич**.

Официальные оппоненты: **Аношкин Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета;

**Трунин Юрий Петрович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского.

Ведущая организация - НИИ механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Защита диссертации состоится 20 мая 2015 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д212.125.05 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)» (МАИ) и на сайте:

[https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=49642](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=49642)

Автореферат разослан "24" марта 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета к.ф.-м.н.

Федотенков Г.В.

## **Общая характеристика работы**

Диссертация посвящена разработке и внедрению программного обеспечения для получения расчетных характеристик материалов используемых в авиационной технике.

### **Актуальность темы диссертации**

Конструктивные элементы из композиционных материалов широко используются не только в авиации, но и в судостроении, различных областях машиностроения, строительстве. Композиционные материалы (КМ) в настоящее время являются наиболее перспективными материалами, ибо обладают высокими удельными механическими характеристиками. Это позволяет более широко использовать КМ в силовых элементах самого широкого назначения. Одним из основных условий при определении параметров таких конструкций является требование минимума массы при выполнении норм прочности, необходимой жесткости, надежности, обеспечения необходимых величин механических характеристик во время эксплуатации агрегата и другие.

Использование КМ для изготовления конкретных конструкций из КМ не может быть осуществлено без необходимых прочностных расчетов.

Основным руководящим документом при проектировании воздушного судна являются авиационные правила (АП-25). В пункте 25.613 данных норм сказано:

- а). Прочностные характеристики материалов должны определяться на основании достаточного количества испытаний с тем, чтобы расчетные значения можно было устанавливать на основе статистики.
- б). Расчетные значения следует выбирать таким образом, чтобы уменьшить вероятность разрушений конструкций из-за непостоянства свойств материала. Соответственно данному параграфу должно быть показано на основе выбора расчетных значений, которые обеспечивают прочность материала со следующей вероятностью:

- 1). 99% - с 95% - ным доверительным интервалом, когда приложенные нагрузки передаются через единичный элемент агрегата, разрушение которого приводит к потере конструктивной целостности агрегата (базис А).
  - 2). 90% - с 95% - ным доверительным интервалом для статически неопределимой конструкции, в которой разрушение любого отдельного элемента приводит к тому, что приложенные нагрузки безопасно распределяются по другим несущим элементам (базис В).
- с). Влияние температуры на допустимые напряжения, применяемые при расчете ответственных элементов или узлов конструкции, должно учитываться, если значительный тепловой эффект имеет место при нормальных эксплуатационных условиях.
- д). Прочность, проектирование и технология конструкции должны свести к минимуму вероятность опасного усталостного разрушения, особенно в местах концентрации напряжений.
- е). Более высокие расчетные значения могут быть использованы, если производится "дополнительный отбор" материала, при котором образец каждого отдельного полуфабриката подвергается испытаниям перед его использованием, чтобы убедиться, что его фактическая прочность равна или выше расчетной.

Для удовлетворения данных требований применяются методики расчета, позволяющие определить расчетные характеристики прочностных свойств материалов. Для уточнения данной методики и применения её в разных областях выполнена данная работа.

Диссертация основана на работах Вейбулла В., Эпштейна Б., Цая С.В., Розена Б.В., Химмельблау Д., Гнеденко Б.В., Колмогорова А.Н., Степнова М.Н., Березина А.В и др.

### **Цель диссертационной работы**

- 1). Автоматизировать методики статистического анализа выборок, по механическим свойствам материалов, для различных вариантов распределений.
- 2). Проанализировать имеющиеся данные по результатам испытаний образцов-свидетелей изготовленных из композиционных материалов.
- 3). Статистически проанализировать результаты испытаний на статическую трещиностойкость и сравнить их с композиционными материалами.
- 4). Применить статистические методики для анализа прочностных свойств от распределения дефектов в металлах, на примере сплава ВТ-5.

### **Научная новизна**

1). Проведен анализ результатов испытаний композитных материалов используемых в авиационных конструкциях. Выявлены зависимости параметров распределений для различных вариантов укладки, вида испытаний, наполнителя и связующего. Применены методики расчета базисных значений характеристик механической прочности для композиционных материалов.

2). Получены значения параметра формы распределения Вейбулла для различных вариантов укладки. Параметр формы для различных вариантов укладки с увеличением выборки приближается к 10.

3). Проведено сравнение вероятностных распределений для композиционных и металлических материалов.

4). Проведен теоретический анализ распределений дефектов в материале ВТ-5. С помощью методики расчета базисных значений получены расчетные значения прочности при различных вариантах распределений дефектов.

### **Достоверность**

Данная работа опробована на экспериментальном материале ОАО «Туполев», наработанном на серийных машинах Ту-204, Ту-214 и Ту-334.

### **Практическая значимость и реализация результатов работы.**

При конструировании любых самолетных конструкций очень важен вопрос о весовой эффективности агрегатов, их прочности и надежности. Для обеспечения этих 3-х важных составляющих безопасности требуется статистическое обоснование расчетных характеристик. Для получения статистически обоснованных расчетных характеристик материалов, была создана база данных со встроенными программами определения базисных значений материалов.

**Апробация результатов диссертации.** Общие результаты работы докладывались на следующих научных конференциях: Научно-техническая конференция «Материалы и технологии для авиационно-космической техники – 2005» (г. Москва ФГУП «ВИАМ» 2005 г.), 4-я международная конференция – 2005 «Авиация и космонавтика – 2005» (г. Москва 2005 г.), всероссийская юбилейная научно-техническая конференция посвященная 70-летию со дня основания СибНИА (г. Новосибирск 2011 г.), международная конференция "Прогнозирование прочности металлических материалов" (г. Белград 2005 г.) Результаты работы докладывались на семинарах в институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН и в институте механики МГУ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводов и списка использованных источников. Общий объем диссертации 90 страницы, содержащий в себе 18 иллюстрации и список использованных источников из 73 наименований.

## Краткое содержание работы.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и методы работы, отмечена новизна и практическое значение работы, даны сведения о публикациях.

В результате работ, выполненных в предыдущие десятилетия научно-исследовательскими институтами ЦАГИ, ВИАМ, НИИТ и др. а также конструкторскими бюро и заводами авиапромышленности, композиционные материалы (КМ) используются во всех отечественных самолетах и вертолетах последнего поколения: Ту-204 (см. рис.1), Ту-334, Ил-96, Ил-114, Ка-50, Ан-70, Ан-148, RRJ-95 и др. Главным образом они применяются при изготовлении органов управления и агрегатов механизации крыла и оперения, лопастей, обтекателей, створок, а также конструкции воздухозаборников и капотов двигательных установок. Успешно эксплуатируются самые крупногабаритные изделия из КМ в отечественном авиастроении - воздухозаборник центрального двигателя самолета Як-42 длиной 7,5 м и створки грузового люка Ан-124 длиной 12 м, оба изделия сотовой конструкции.

Потенциальный объем применения КМ в планере пассажирских самолетов после 2020 г. ожидается на отметке 60-70% при снижении массы композитной части конструкции и ее стоимости на 20-25% по сравнению с металлической, изготовленной на современном уровне. В то же время прогресс в области металлических конструкций по указанным показателям прогнозируется на уровне не выше 10%. По оценкам экспертов развитие композитных технологий наряду с прогрессом в двигателестроении и в аэродинамике внесет наибольший вклад в повышение летно-технических, экономических и эксплуатационных характеристик летательных аппаратов будущего.

## Применение полимерных композитных материалов в конструкции самолета Ty-204-120

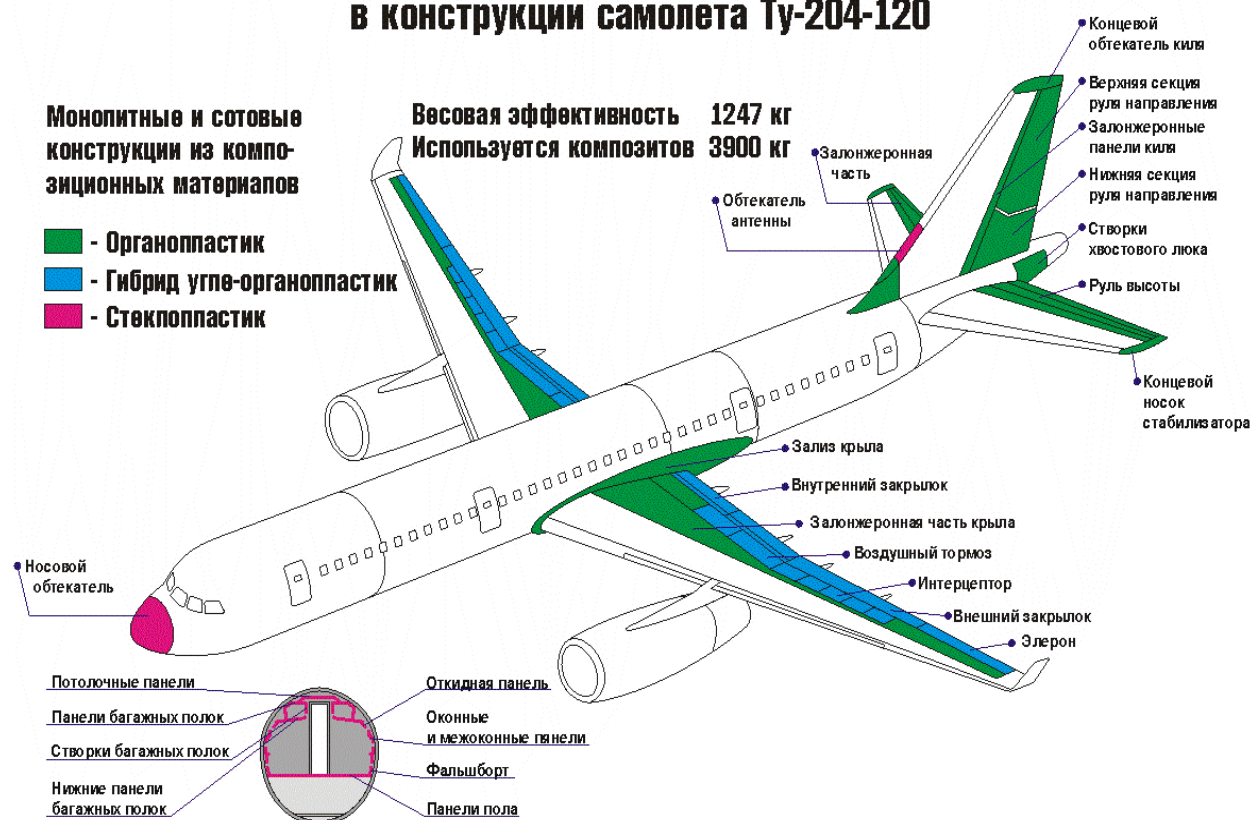


Рис. 1. Схема применения пластиков в конструкции самолета Ty-204.

**В первой главе** предоставлены методики расчета базисных характеристик материалов.

В процессе серийного производства необходимо систематически проверять механические свойства применяемых материалов. Этим самым обеспечивается выполнение двух задач:

- возможность подтверждения и корректировки характеристик, принятых при проектировании;
- надежный контроль за стабильностью производства.

Такой контроль в серийном производстве может быть обеспечен только при наличии достаточной статистики.

Так как закон распределения характеристик прочности заранее неизвестен для описания полученных выборок, после испытаний образцов используются несколько видов распределений, наиболее часто используются



параметрические распределения, как-то двухпараметрический Вейбулл, нормальное или логнормальное распределение. Для определения А и В базиса используются все виды распределений, так же в первой главе предоставлен метод обозначенный как ANOVA-метод, для вычисления базисных значений, когда имеется значительный разброс от партии к партии.

Применяемый метод вычисления базисных значений для одной выборки зависит от предполагаемой формы распределения данных. Наиболее часто используют параметрические распределения, как-то двухпараметрический Вейбулл, нормальное или логнормальное распределение. Для проверки соответствия выборки данным распределениям применяется тест Андерсона-Дарлинга. Для каждого распределения вычисляется наблюдаемый уровень значимости, его величина есть мера качества приближения экспериментальных данных к данному распределению.

Если уровень значимости меньше, либо равен 0,05, тогда можно сделать вывод, (при 5% риска ошибиться), что совокупность, из которой взята выборка, не распределена нормально. В противном случае, при значении большем 0,05 гипотеза о принадлежности выборки данному распределению не отвергается. Алгоритм получения расчетных характеристик представлен на ниже приведенной блок-схеме.

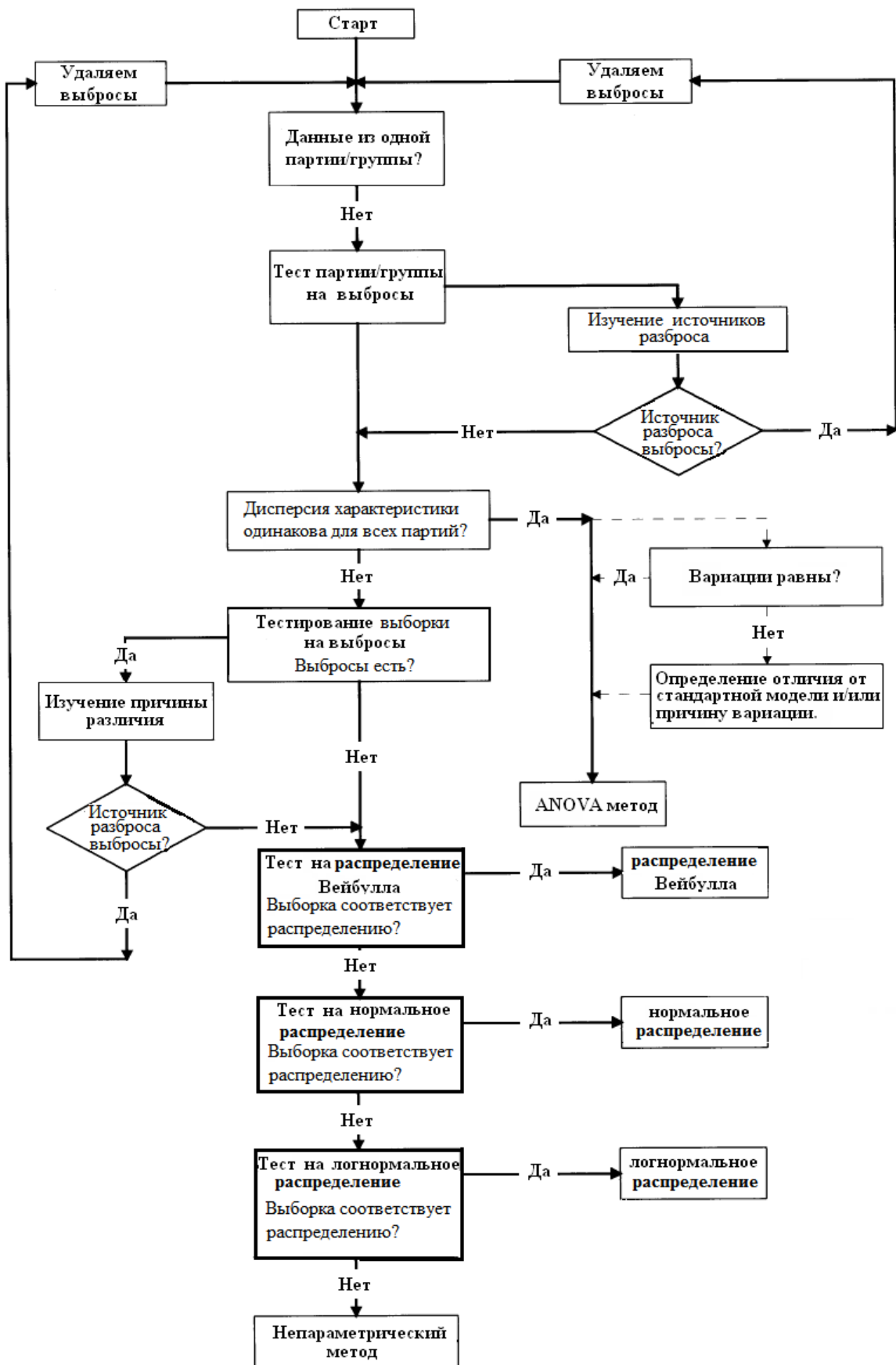


Рис. 2 Блок-схема определения базисных значений.

Для получения базисных величин по условиям, приведенным выше, требовался определенный программный продукт для хранения, обработки экспериментальных данных и получения расчетных характеристик. Порядок обработки данных представлен на блок-схеме (см. рис. 2).

На рис. 2 представлена блок-схема обработки результатов испытаний образцов. Таким образом, обработка данных проводится в следующей последовательности:

1. Проводится проверка данных на соответствие одной группе.
2. Проводится тест на наличие в партии аномальных значений. Если аномальное значение обнаружено, оно удаляется из партии и партия заново проходит тест на выбросы. Так происходит до тех пор, пока все выбросы не будут удалены из всех партий.
3. Далее проводится тест на различие между внутривыборочными дисперсиями. Если дисперсии одинаковы, то можно применять метод ANOVA.
4. Далее все данные независимо от партий замешиваются в одну выборку и проводится проверка на наличие выбросов во всей совокупности.
5. Если аномальные значения обнаружены, они удаляются из общего объема данных и заново выборка проходит проверку, если выбросы более не обнаружены, далее с помощью теста Андерсена-Дарлинга выборка проверяется на соответствие различным распределениям.
6. Рассматриваются распределения Вейбулла, нормальное распределение и логнормальное распределение.
7. Если выборка не удовлетворяет не одному из перечисленных распределений, применяется непараметрический метод.

За годы эксплуатации самолетов Ту-204 был накоплен большой объем экспериментальных данных по испытаниям композиционных материалов. Такой объем данных был получен благодаря тому, что для композиционных деталей существует 100% контроль, т.е. все детали, которые устанавливаются на самолет проходят контроль на соответствие техническим условиям. Основным критерием качества изготовления является прочностные свойства на растяжение и сжатие. Данные свойства проверяются на так называемых образцах свидетелях, это образцы, вырезаемые из припуска детали. Был накоплен большой объем данных, более 15000 испытанных образцов. Для систематизации и обработки данных была создана база данных, в которую были внесены все результаты испытаний.

В базу данных была встроена программа расчета базисных значений, что позволяло производить расчет для различных видов образцов.

Был проведен расчет по всем имеющимся в базе значениям по типовым укладкам таким как

- 1).  $\pm 45$ .
- 2).  $\pm 45-0$ .
- 3).  $\pm 45-0-90$ .
- 4).  $\pm 45-90$ .

Наполнитель так же был различный, органик (ткань типа СВМ), гибрид (ЭЛУР+СВМ) и углепластик (ЭЛУР).

По всем типам образцов были проведены расчеты. Определялся параметр формы распределения Вейбулла для образцов испытанных на растяжение и сжатие, результаты приведены в таблицах 1, 2.

Растяжение

Таблица 1

Укладка	Параметр формы распределения Вейбулла $\alpha$	Наполнитель	Коэффициент вариации	Количество образцов
±45	2	Органит	54,23%	105
	2,3	Углепластик	46,72%	300
±45-0	10,9*	Гибрид	<15%	1784
	10	Органит	11%	1820
	8,8	Углепластик	12%	135
±45-0-90	9,8*	Гибрид	<15%	2540
	9,3	Органит	13%	180
±45-90	9,2	Органит	12,73%	115

Сжатие

Таблица 2

Укладка	Параметр формы распределения Вейбулла $\alpha$	Наполнитель	Коэффициент вариации	Количество образцов
±45	12	Органит	7,58%	220
±45-0	10,02*	Гибрид	<15%	1209
	10,02*	Органит	<15%	2655
	12	Углепластик	6,7%	145
±45-0-90	9,65*	Гибрид	<15%	2870
	9,1*	Органит	<15%	450
±45-90	9,95*	Органит	<15%	185

\* - средние значения по разным типам укладок

**Во второй главе** для оценки влияния дефектности на деформационные характеристики материалов в качестве примера был взят материал ВТ5. Учет дефектности дает возможность выяснить влияние её на деформационные характеристики материала. В главе оценено влияние дефектности на прочностные характеристики с применением статистических методов приведенных в первой главе. В оценке применялись:

1). Схема Батдорфа - Будянского, состоит в том, что для каждого зерна предполагается существование одной только системы скольжения. Здесь была сделана гипотеза о том, что напряженное состояние однородно и не меняется от зерна к зерну.

2). Вторая гипотеза состоит в том, что деформация зерен с системой скольжения  $n\beta$  вызывает такую же общую деформацию тела, пропорциональную относительно объему соответствующих зерен.

Итак, деформация тела в целом представляет собой результат наложения бесконечно большого числа чистых сдвигов для всех возможных систем скольжения  $n\beta$ . Чтобы вычислить эту деформацию, требуется перейти к составляющим тензора деформации относительно фиксированных осей  $x_i$  по формулам преобразования компонент тензора второго ранга. Принимая направления  $n$  и  $\beta$  за направления 1 и 2 новой системы координат, нужно принять все  $e_{ij}$  равными нулю, кроме  $e_{12} = \gamma_{n\beta}/2$ .

Формулы для пластических деформаций имеют вид

$$e_{ij}^p = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (n_i \beta_j + n_j \beta_i) F(\tau_{n\beta}) d\Omega d\beta \quad (9)$$

Здесь  $\Omega$ -поверхность единичной сферы. Касательное напряжение  $\tau_{n\beta}$  вычисляется по обычной формуле

$$\tau_{n\beta} = \sigma_{ij} n_i \beta_j \quad (10)$$

Рассматривается пластическое тело, при деформировании которого происходит образование и изменение размеров микротрещин. Аналогично принимается, что:

- 1). При достижении напряженно-деформированным состоянием условий зарождения микротрещин в системе скольжения образуется  $k_0$  дефектов размера  $R_0$  на единицу площади;
- 2). При дальнейшем деформировании оставшаяся не разрушенной часть плоскости скольжения деформируется сдвигом, величина которого зависит только от эффективного касательного напряжения, большего своих предыдущих значений;
- 3). Изменение размеров микротрещин определяются условием их роста.

Для установления зависимостей деформационных характеристик от вида функции роста микротрещин отвлечемся от наличия изменения объема материала, т.е. предположим тело несжимаемым. И учтя это, используем модель плоского тела для вывода соотношений между девиаторами напряжений и деформаций при сложнапряженном состоянии.

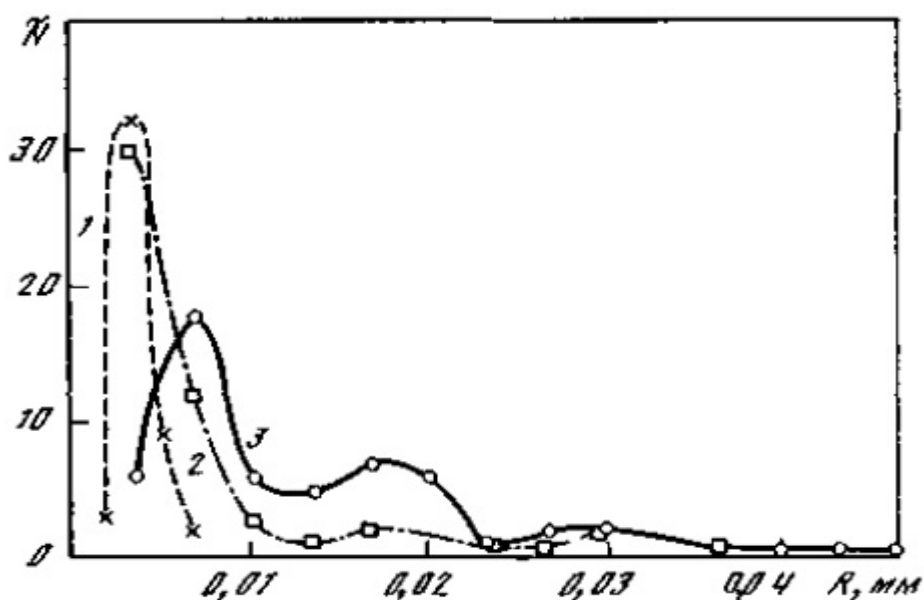


Рис. 3. Распределение дефектов по размерам при различных уровнях остаточной деформации сплава ВТ-5 (1-11%, 2-21%, 3-42%).

Используя первую кривую распределения размеров дефектов от величины пластической деформации, получим величины пластической деформации.

Взяв для кривых деформацию 5% и посчитав для данной деформации количество дефектов, используя кривую распределения дефектов по размерам при различных уровнях остаточной деформации, получаем следующую таблицу и график распределения предела прочности от размеров дефектов.

По условию неустойчивости вычисляем прочность

$$\Phi = 1 - \frac{R}{a} \left\{ 1 + \frac{R'(\gamma, u)}{R} F_1' \left[ \frac{\tau_{12}}{\sqrt{2} \left(1 - \frac{R}{a}\right)} \right] \frac{\sigma}{\sqrt{2} \left(1 - \frac{R}{a}\right)} \right\} = 0$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{2}(a - R)^2}{a R'(\gamma, u) F_1' \left[ \frac{\tau_{12}}{\sqrt{2} \left(1 - \frac{R}{a}\right)} \right]}$$

$$R'[\gamma, u] = \left( R_0 \exp \left[ \frac{\gamma - \gamma_0}{2(1-n)} \operatorname{sh} \frac{(1-n)\sigma_0}{\sigma_i} \right] \right)' = R_0 \frac{\operatorname{sh} \frac{(1-n)\sigma_0}{\sigma_i}}{2(1-n)} \exp \left[ \frac{\gamma - \gamma_0}{2(1-n)} \operatorname{sh} \frac{(1-n)\sigma_0}{\sigma_i} \right]$$

$$F_1 = c_1 \left[ \frac{\tau_{12}}{\tau_L \left(1 - \frac{R}{a}\right)} - 1 \right]$$

$$F_1' = \frac{c_1}{\tau_L \left(1 - \frac{R}{a}\right)}$$

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}(a - R)^2}{\frac{\operatorname{sh} \frac{(1-n)\sigma_0}{\sigma_i}}{a R_0 \frac{\operatorname{sh} \frac{(1-n)\sigma_0}{\sigma_i}}{2(1-n)} \exp \left[ \frac{\gamma - \gamma_0}{2(1-n)} \operatorname{sh} \frac{(1-n)\sigma_0}{\sigma_i} \right]} \frac{c_1}{\tau_L \left(1 - \frac{R}{a}\right)}$$

R - размеры дефекта;

a - среднее расстояние между двумя микротрещинами;



$\sigma_B$  - разрушающее напряжение;

$\tau_L$  - напряжение сдвига при пластичности

$R'_\gamma(\gamma, u)$  - скорость роста микродефектов

$c_1=0,1$

$a=0,05$  мм

$\tau_L=32$  кгс/мм<sup>2</sup>

$R_0=0,017$  мм

$n=23$

$\sigma_0/\sigma_i=1/3$

$\Delta=\gamma-\gamma_0$

Используя распределение дефектов приведенные на рис. 3 были построены экспериментальные кривые распределения размеров дефектов при различной остаточной деформации. С помощью данных кривых были определены базисные значения размеров дефектов для различных величин остаточной деформации и с помощью выше приведенных формул был рассчитан предел прочности. Результаты расчета сведены в таблицу 3.

Таблица 3.

Остаточная деформация, %	Базисные размеры дефектов R мм	$\sigma_B$ кгс/мм <sup>2</sup>	$\Delta$
11	0,005222	61,8	0
22	0,018444	6,8	0,075
42	0,028111	0,2	0,2325

**В третьей главе** представлен алгоритм получения характеристик статической трещиностойкости для всех видов металлических материалов. По полученному алгоритму составлена программа расчета. В программе используется расчет вязкости разрушения для различных видов образцов, таких как:

1. Образец с центральной трещиной.
2. Образец с одним боковым надрезом.
3. Образец с двумя боковыми надрезами.
4. Образец полоса с отверстием с одним надрезом.
5. Образец полоса с отверстием с двумя надрезами.
6. Образец на внецентренное растяжение.

Расчетные значения  $K_{Ic}$   $K_c^y$  (ниже в формулах обе характеристики обозначаются как  $K_c^p$ ) определяются в случае удовлетворения требуемому объему данных как

$$K_c^p = \frac{\sum_{i=1}^n K_{ci}}{n},$$

при  $S_{сум.}/K_c \leq 0,05$  и при испытанных 3-х и более полуфабрикатах где

$$S_{сум.} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_c^p - K_{ci})^2}{n-1}} - \text{суммарное рассеяние,}$$

n - количество экспериментальных точек.

Также представлен алгоритм получения характеристик параметров различных аппроксимационных зависимостей, скорости роста трещины усталости от размаха коэффициента интенсивности напряжения. В данном случае представлены параметры Периса, Формана и Коллиприста.

$$\frac{dl}{dN} = C_n \left( \frac{\Delta K}{(1-R)^p} \right)^{m_n} - \text{уравнение Периса}$$

$$\frac{dl}{dN} = C_k \left[ \frac{\lg \Delta K - \lg K_{th}}{\lg K_c - \lg \Delta K} \right]^{m_k} \quad \text{- уравнение Коллиприста}$$

$$\frac{dl}{dN} = C_\phi \frac{\Delta K^{m_\phi}}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad \text{- уравнение Формана}$$

Для материалов АК6чТ1 и ВТ6ч был набран экспериментальный материал, который был обработан по приведенным выше методикам и построены экспериментальные вероятностные кривые. Показано, что в отличие от композиционных материалов распределение характеристик трещиностойкости хорошо описывается нормальным законом (см. рис. 4, 5).

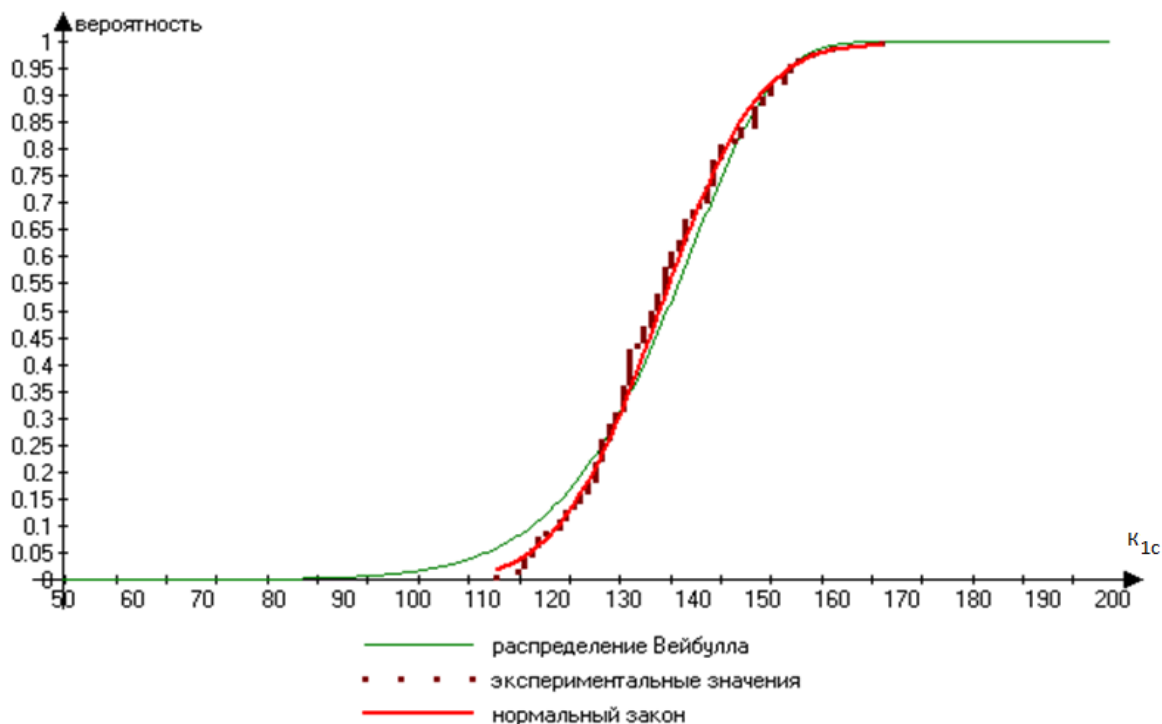


Рис. 4. Экспериментальная и расчетные функции распределения, построенная по результатам обработки эксперимента по определению  $K_{1c}$  сплава АК6чТ1 штамповка.

Таблица 4

	$K_{1c}$ (А базис) (кгс/мм <sup>3/2</sup> )	$K_{1c}$ (В базис) (кгс/мм <sup>3/2</sup> )	Критерий значимости
Нормальный закон	105,1	118,1	0,455
Распределение Вейбулла	109,9	113	0,002
Логнормальный закон	107,96	118,8	0,665
Непараметрический метод	99	117	

Общие сведения:

Число образцов 100

Число партий 50

Минимальное значение 112 кгс/мм<sup>3/2</sup>

Максимальное значение 167 кгс/мм<sup>3/2</sup>

Среднее 135,22 кгс/мм<sup>3/2</sup>

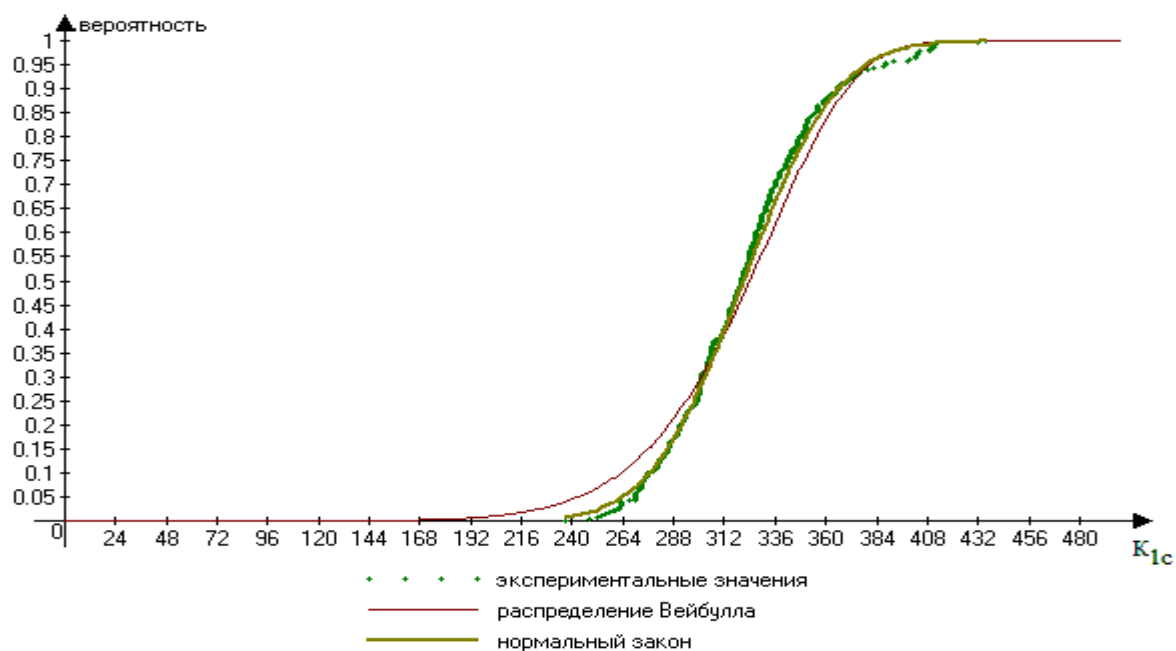


Рис. 5. Экспериментальная и расчетные функции распределения, построенные по результатам обработки эксперимента по определению  $K_{1c}$  сплава ВТ6ч плита.

Таблица 5

	$K_{1c}$ (А базис) (кгс/мм <sup>3/2</sup> )	$K_{1c}$ (В базис) (кгс/мм <sup>3/2</sup> )	Критерий значимости
Нормальный закон	233,5	272	0,01
Распределение Вейбулла	251,6	256,5	0
Логнормальный закон	243,8	274,5	0,39
Непараметрический метод	237	273	

Общие сведения

Число образцов 326

Число партий 163

Минимальное значение 237 кгс/мм<sup>3/2</sup>

Максимальное значение 436 кгс/мм<sup>3/2</sup>

Среднее 321,4 кгс/мм<sup>3/2</sup>

### **Выводы по работе.**

1. Создана база данных результатов испытания композиционных материалов, с встроенным статистическим анализом. Наличие общей базы данных по материалам позволяет производить контроль качества производства композиционных материалов, легкий и удобный способ доступа к результатам испытаний.
2. Проведен статистический анализ результатов испытаний образцов-свидетелей испытанных на заводе изготовителе. При анализе результатов испытаний образцов-свидетелей с различными вариантами укладок был получен результат, такой, что параметр формы распределения Вейбулла при наличии большого количества данных и небольшого разброса приближается к одному и тому же значению равному 10.
3. Создана программа расчета параметров трещиностойкости. Проанализированы результаты испытаний на статическую трещиностойкость материалов АК6чТ1 штамповка и ВТ6ч плита. Построены вероятностные кривые. Показана хорошая сходимость нормального закона с экспериментальными данными.
4. Дан теоретический расчет зависимости предела прочности от количества дефектов в материале ВТ-5. Показано, что с уменьшением дефектности прочность материала увеличивается.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**  
***Публикации в журналах из перечня ВАК ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук:***

1. Березин А.В., Абдуллин М.Р. Оценка эффективности комбинированного стрингера //Проблемы машиностроения и автоматизации, 2004, № 4, с. 48-51.
2. Березин А.В., Абдуллин М.Р. Прогнозирование базисных значений прочности металлических материалов по распределению микродефектов, образующихся в процессе пластической деформации //Проблемы машиностроения и автоматизации, 2006, № 3, с. 40-44.

***Публикации в других научных изданиях и журналах***

3. Berezin A.V., Abdullin M.R. Prognosis strength of metallic materials via distribution micro defects appear during plastic deformations process //X International Conference Dependability and Quality and Management Proceeding Belgrade Serbia 13-14 June 2007, p. 48-54.
4. М.Р. Абдуллин "База данных и расчет базисных характеристик деталей композиционных агрегатов"//4-я международная конференция "Авиация и космонавтика - 2005" 10-13 октября 2005 года. Москва. Тезисы докладов. стр. 79.
5. М.Р. Абдуллин "Статистическое обоснование прочности расчетных значений композиционных материалов"// Аэродинамика и прочность конструкции летательных аппаратов. Труды всероссийской юбилейной научно-технической конференции, посвященной 70 - летию со дня основания СибНИА 2011 г. стр. 327-330.