

УДК 620.179:678.747.2

С.Е. Истягин¹, В.И. Постнов¹**О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СВОЙСТВ УГЛЕПЛАСТИКОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-101-110

Углепластики, армированные ткаными наполнителями, широко распространены в средне- и сильнонагруженных деталях конструкций летательных аппаратов. Полимерные композиционные конструкционные материалы, изготовленные из углетканых наполнителей и применяемые в авиастроении, ценятся за их удельные прочностные характеристики, измерение и анализ которых возможны путем применения неразрушающего контроля (НК). Приводятся результаты дополнительных исследований, показывающие важность применения методов повышения точности корреляционных уравнений по результатам НК.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, неразрушающий контроль, информативный параметр контроля, углепластик, динамический модуль упругости, корреляция.

S.E. Istyagin¹, V.I. Postnov¹**ABOUT INCREASE ACCURACY OF CORRELATION DEPENDENCE PARAMETERS NONDESTRUCTIVE CONTROL AT DIAGNOSTICS OF PROPERTIES COAL PLASTICS**

Coal plastics reinforced with woven fillers are widely distributed in medium- and strongly loaded details of designs of aircraft. The polymeric composition constructional materials made from coal fillers and used in aircraft construction are appreciated their specific strength characteristics. Measurement and which analysis is possible with applying of the nondestructive control (NC). Contains of additional researches showing importance of application of methods of increase in accuracy of the correlation equations based by NC.

Keywords: polymer composite material, non-destructive testing, informative parameter of control, carbon fiber, dynamic modulus of elasticity, correlation.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Актуальным до настоящего времени остается вопрос оценки надежности полимерных композиционных материалов (ПКМ). Очевидно, что материал должен иметь необходимые для его эксплуатации упруго-прочностные свойства [1]. Существуют традиционные направления теории надежности – например, статистический анализ нагрузок и применение коэффициента надежности [2]. Развиваются также сравнительно новые направления, такие, например, как способы определения сохранения механических

свойств, применяющиеся в основном для оценки остаточного срока службы [3]. По окончательным данным принимается решение о замене детали либо о ее ремонте.

Надежность – это свойство сохранять с течением времени значения всех параметров, которые необходимы для выполнения требуемых функций [4]. Важнейшим понятием в теории надежности является понятие предельного состояния. Оно в свою очередь характеризуется предельной прочностью [5]. Если обеспечивается условие необходимой прочности, то также соблюдается условие необходимого уровня надежности [6]. Благодаря этому, теория надежности указывает пути и методы обеспечения необходимого уровня физико-механических характеристик. С математической точки зрения оценка надежности машин представляет собой вероятностно-статистический подход. Данный подход легко реализуется в условиях крупносерийного и массового производства, где может быть набрана большая статистика по надежности в условиях эксплуатации [7].

Целью расчета является ответ на вопрос: удовлетворяет ли материал, конструкция или деталь требованиям надежности, которые к ним предъявляются. Предшествующим этапом является формирование принципов, по которым будут оцениваться условия достаточной надежности. Например, в случае определения напряжения, необходимо понимать, зачем это нужно и что с полученными данными следует делать в дальнейшем [8]. Определение напряжений не является единственной целью, а возникает вопрос о возможности использования полученных результатов для оценки надежности конструкции.

Физико-механические свойства изделий из ПКМ зависят от многих факторов. Например, это взаимное расположение и свойства входящих в состав композита фаз, их соотношение, свойства границы раздела фаз и др. Девиация параметров цикла изготовления изделий неизбежно приводит к случайному характеру значений прочностных свойств, к их распределению в объеме материала и отклонениям от геометрических размеров. Нестабильность технологических процессов приводит к неравномерности и статистическому распределению значений механических свойств [9–11].

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [12].

Материалы и методы

В условиях эксплуатации деталей и изделий существует много переменных нагрузок, воздействующих на конструкцию и зависящих от свойств материала. При современном уровне научного развития и средств измерения, действительное распределение напряжений, возникающих при эксплуатации, и их предельные локальные значения в материале невозможно достоверно определить. В случае композиционных материалов дополнительной сложностью для предвидения всех таких нагрузок является различие возникающих напряжений в материале в зависимости от осей ортотропии. Одним из способов применения неразрушающего контроля (НК) в теории надежности является косвенное измерение механических характеристик до и после выбранного периода эксплуатации. Вычисляется коэффициент сохранения свойств. После сравнения полученных данных прогнозируется остаточный ресурс изделия и выносится решение о дальнейшей эксплуатации. Предшествующим этапом в этом случае является составление корреляционных уравнений, связывающих

информативные параметры НК с фактическими статическими испытаниями образцов-свидетелей [13, 14]. Таким образом проверяется возможность применения НК для конкретного материала.

Для косвенного определения упруго-прочностных характеристик материала широко применяются методы НК [15]. При НК необходимо измерять такой параметр, который являлся бы адекватной мерой напряжений, возникающих в материале. Адекватность в этом случае определяется при помощи математического анализа и точности корреляционных уравнений, связывающих информативный параметр НК и фактические значения упруго-прочностных характеристик после статических либо иных испытаний образцов-свидетелей. Обозначив параметр контроля S , а предельное напряжение (прочность) – σ , получим зависимость $\sigma=f(S)$, где $f(S)$ – некая корреляционная зависимость. Чем сильнее корреляция информативного параметра и предела прочности, тем адекватнее используемая модель расчета эффективных характеристик, но при условии, что полученная модель (зависимость) проходит математическую проверку на значимость.

Известно, что локальная потеря прочности, как правило, не совпадает с потерей прочности всей конструкции [16]. В отличие от локальной прочности, конструкционная прочность зависит от взаимодействия конструкции с окружающей средой, ее геометрической формы и сложно-напряженного состояния, возникающего при этом [17]. В рамках данного исследования ограничимся локальной прочностью материала.

Для повышения точности корреляционных уравнений необходимо исследовать образцы-свидетели с достаточным разбросом упруго-прочностных свойств. Определить необходимый уровень разброса для построения уравнения регрессии представляется возможным лишь экспериментальным методом с использованием статистического анализа. Необходимый уровень разброса упруго-прочностных свойств для каждого материала и каждой пары «зависимая характеристика/определяющий информативный параметр (объясняющая переменная)» различен и определяется отдельно. Поскольку модуль упругости равен отношению напряжения к деформации, для исследований выбрали метод определения динамического модуля упругости (E_d) по периоду затухания колебаний. Осуществляли данный метод на приборе неразрушающего контроля ИМД-2003, созданном на базе УНТЦ ФГУП «ВИАМ».

Перед тем как использовать любые экспериментальные данные, необходимо провести математический анализ полученного массива. Посредством такого анализа проверяется возможность применения массива данных для дальнейшей обработки: составления корреляционных уравнений, определения доверительных интервалов и т. п. Во многих работах не приводится математическая обработка экспериментальных данных.

Для изготовления образцов с естественными технологическими дефектами, между слоями препрега КМУ-11тр закладывают слои сухой углеткани УТ-900 в соотношении 50 и 30% от общего количества слоев. Поскольку в сухой ткани скорость течения связующего велика, то течение в макропорах опережает течение в микропорах, где и остается воздух. Остаточный воздух в непропитанной ткани служит причиной повышенной пористости, которая снижает механические характеристики пластика. Воздушная среда также создает дополнительную неравномерность температурного поля. Методом определения пустот в композитах [18] рассчитана пористость образцов из плит углепластика с содержанием сухих слоев 30 и 50% (табл. 1).

**Результаты определения пористости углепластиков
с содержанием сухих слоев 30 и 50%**

Содержание сухих слоев, %	Плотность, г/см ³	Весовое содержание, %		Объемное содержание, %		Пористость, %
		связующего	наполнителя	связующего	наполнителя	
30	1,61	33,20	66,80	39,50	59,90	0,50
	1,58	32,10	67,90	37,50	59,80	2,7
	1,58	34,60	65,40	40,50	57,70	1,70
	1,58	36,70	63,30	43,10	56,00	1,00
	1,58	33,60	66,40	39,40	58,80	1,80
	1,58	36,70	63,30	42,9	55,80	1,30
	1,59	35,00	65,00	41,1	57,50	1,30
	1,59	32,70	67,30	38,4	59,60	2,00
	1,57	37,60	62,40	43,8	54,90	1,30
Среднее значение	1,58	34,69	65,30	40,69	57,79	1,52
50	1,53	31,10	68,90	35,2	58,80	6,00
	1,53	29,60	70,40	33,6	60,20	6,20
	1,50	32,10	67,90	35,8	57,00	7,20
	1,56	27,90	72,10	32,3	63,00	4,70
	1,56	27,40	72,60	31,7	63,30	5,00
	1,57	29,10	70,90	33,8	62,00	4,20
	1,54	26,80	73,20	30,6	63,10	6,20
	1,55	28,20	71,80	32,3	62,10	5,60
	1,48	28,30	71,70	31,1	59,40	9,50
Среднее значение	1,54	28,95	71,05	32,94	61,00	6,06

Видно, что при содержании сухого наполнителя 50% пористость возрастает в 4 раза относительно пористости при содержании сухого наполнителя 30% и составляет 6,06%. Таким образом, обеспечивается уровень разброса механических характеристик путем создания дефектов, которые оказывают влияние на информативный параметр контроля E_d .

Объектом исследования механических характеристик служили образцы из углепластика КМУ-11тр размером 250×12×2 мм, предназначенные для входного контроля предела прочности при растяжении [19]. После замера динамического модуля упругости проводили испытания на разрушение для определения предела прочности при растяжении (σ_p). Имеющийся массив экспериментальных данных приведен в табл. 2.

Для того чтобы считать полученные данные достоверными и использовать их в дальнейшем для составления уравнений с помощью регрессионного анализа, необходимо провести статистический анализ параметров каждого из столбцов табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета динамического модуля упругости (E_d) и испытаний на прочность при растяжении (σ_p)

Условный номер образца	Содержание сухих слоев 50%				Содержание сухих слоев 30%			
	по основе [0°]		по утку [90°]		по основе [0°]		по утку [90°]	
	σ_p , МПа	E_d , ГПа	σ_p , МПа	E_d , ГПа	σ_p , МПа	E_d , ГПа	σ_p , МПа	E_d , ГПа
1	730	62,8	639	61,7	699	64,7	728	63,7
2	742	63,7	650	64,3	746	59,1	738	62,4
3	747	64,4	651	65,2	748	69,8	739	56,6
4	753	66,1	651	63,9	756	66,3	753	64,3
5	759	69	668	64,8	757	67	767	64,8
6	762	59,6	672	63,2	762	65,6	767	64,4
7	768	65,8	684	64,9	765	67,4	779	62
8	769	66,7	696	63,5	767	68,3	785	64,4
9	772	65,1	697	63,8	773	64,4	785	62,7
10	772	69	708	64	778	69,3	786	64,5
11	784	63,1	724	68,9	780	65,2	795	63,7
12	798	80,4	728	76,9	784	69,2	796	63,7
13	805	88,5	730	73,1	785	66	798	64,5
14	813	82,8	734	77,3	792	67,8	799	64,8
15	819	86,2	751	81,2	795	65,3	799	64,6
16	823	85,3	764	77,1	795	66,8	800	64,6
17	825	88,2	769	77,3	807	68,4	800	62,7
18	826	83,3	772	76,1	810	64,9	824	68,2
19	834	86,7	781	80	825	65,8	828	64,4
20	835	88,6	800	85	825	65,1	–	–
21	861	90	827	84,1	830	48,7	–	–
22	–	–	–	–	834	64,4	–	–
23	–	–	–	–	848	65,8	–	–
24	–	–	–	–	860	69,2	–	–
25	–	–	–	–	865	68,2	–	–

Расчетные параметры – показатели вариации:

- среднее линейное отклонение (d) – для оценки отличия отдельных измерений от среднего значения;
- среднее квадратическое отклонение (S) – показывает абсолютную неопределенность выборки относительно среднего значения, мера дисперсии выборки;
- относительный коэффициент вариации (v) – мера однородности выборки, устойчивости ее значений.

На основании предварительного анализа показателей вариации проведем регрессионный анализ зависимости прочности при растяжении (y) от динамического модуля упругости (x):

1. Средние арифметические: \bar{x} , \bar{y} , \bar{xy} .
2. Дисперсии и средние квадратические отклонения соответственно: $S^2(x)$, $S^2(y)$ и $S(x)$, $S(y)$.
3. Коэффициенты уравнения регрессии: a и b .
4. Коэффициент корреляции (r_{xy}) принимает значения от -1 до +1 (оцениваются по шкале Чеддока).

5. Проверка значимости коэффициента корреляции и коэффициентов уравнения регрессии по выдвинутым гипотезам:

- $r_{xy}=0$ – нет линейной взаимосвязи между переменными;
- $r_{xy}\neq 0$ – есть линейная взаимосвязь между переменными.

Для того чтобы проверить «нулевую» гипотезу, необходимо вычислить величину случайной ошибки $t_{набл}$ и сравнить ее со значением $t_{крит}$ таблицы Стьюдента при коэффициенте доверительной вероятности $\alpha=0,01$ и числе степеней свободы $k=n-m-1$ (n – количество образцов; $m=1$ – количество объясняющих факторов (E_d)). При $t_{крит}>|t_{набл}|$ корреляция признается незначимой. При $|t_{набл}|>t_{крит}$ – «нулевую» гипотезу исключают и корреляцию признают статистически значимой.

Подобным образом проверяется статистическая значимость коэффициентов a и b полученного уравнения при сравнении величины $t_{крит}$ с t_a и t_b . Предварительно рассчитывают S_a и S_b – стандартные отклонения регрессии случайных величин a и b .

6. Средняя ошибка аппроксимации \bar{A} – отклонение расчетных значений от фактических.

7. Коэффициент детерминации R^2 показывает изменение значений $y(\sigma_p)$ через вариацию факторного признака $x(E_d)$, т. е. во скольких случаях из 100 изменения $x(E_d)$ приводят к изменению $y(\sigma_p)$, численно этот коэффициент равен квадрату коэффициента корреляции.

Коэффициент детерминации R^2 используется для проверки существенности уравнения линейной регрессии в целом. Данная проверка проводится посредством F -критерия Фишера (F). Если расчетное значение критерия при $k_1=m$ и $k_2=n-m-1$ степенях свободы больше табличного значения при заданном уровне значимости, то модель считается значимой. В данных условиях $F_{табл}=8,18$.

Результаты расчетов с комментариями для каждого из параметров приведены в табл. 3 и 4. Исключив в данном случае из описания сложные математические вычисления, приведем конечные результаты.

Таблица 3

Результаты расчета показателей вариации

Расчетный показатель	Содержание сухих слоев 50%				Содержание сухих слоев 30%				Примечание
	по основе [0°]		по утку [90°]		по основе [0°]		по утку [90°]		
	σ_p , МПа	E_d , ГПа	σ_p , МПа	E_d , ГПа	σ_p , МПа	E_d , ГПа	σ_p , МПа	E_d , ГПа	
Среднее линейное отклонение (d)	31,97	10,50	45,01	7,20	31,1	2,4	21,68	1,30	–
Дисперсия (S)	35,678	10,832	52,760	7,705	38,639	4,116	26,910	2,107	–
Относительный коэффициент вариации (v), %	4,52	14,40	7,34	10,81	4,88	6,26	3,44	3,31	Поскольку $v<30\%$, то совокупности однородны, а вариация незначительная

После анализа совокупностей случайных величин очевидно, что полученные результаты достоверны и их можно использовать для дальнейших расчетов. Далее переходят к расчету уравнений регрессии и их проверке.

Результаты регрессионного анализа

Расчетный параметр	Содержание сухих слоев 50%		Содержание сухих слоев 30%		Примечание
	по основе [0°]	по утку [90°]	по основе [0°]	по утку [90°]	
\bar{x} , ГПа	75,014	71,252	65,708	63,737	–
\bar{y} , МПа	790,333	718,857	791,440	782,421	–
\overline{xy}	59641,21	51593,70	51993,09	49900,17	–
$S^2(x)$, ГПа	117,34	59,36	16,94	4,44	–
$S^2(y)$, МПа	1273,56	2783,65	1493	724,14	–
$S(x)$, ГПа	10,832	7,704	4,116	2,107	–
$S(y)$, МПа	35,687	52,760	38,639	26,910	–
a	563,440	270,631	833,82	335,62	–
b	3,025	6,291	-0,64	7,01	–
r_{xy}	0,918	0,919	-0,068	0,549	При содержании сухого наполнителя 50% связь между σ_p и E_d в обоих направлениях вырезки образцов очень высокая и прямая. При содержании сухого наполнителя 30%: – по основе связь – очень незначительная и обратная; – по утку – заметная и прямая
$t_{набл}$	10,098	10,133	0,328	2,708	При содержании сухого наполнителя 50% $ t_{набл} > t_{крит} = 2,861$, следовательно, линейное уравнение регрессии значимо. При содержании сухого наполнителя 30%: – по основе $ t_{набл} < t_{крит} = 2,807$, следовательно, линейное уравнение регрессии незначимо; – по утку $ t_{набл} < t_{крит} = 2,898$, следовательно, линейное уравнение регрессии незначимо
S_k	14,87	21,92	40,19	23,78	–
S_a	0,3	0,621	128,561	165,101	–
S_b	22,703	44,49	1,953	2,589	–
t_a	10,1	6,08	6,48	2,03	При содержании сухого наполнителя 50% $t_a > t_{крит} = 2,861$, следовательно, коэффициент регрессии значим. При содержании сухого наполнителя 30%: – по основе $t_a > t_{крит} = 2,807$, следовательно, коэффициент регрессии значим; – по утку $t_a < t_{крит} = 2,898$, следовательно, коэффициент регрессии незначим
t_b	24,82	10,13	0,33	2,71	При содержании сухого наполнителя 50% $t_b > t_{крит} = 2,861$, следовательно, коэффициент регрессии значим. При содержании сухого наполнителя 30%: – по основе $t_b > t_{крит} = 2,807$, следовательно, коэффициент регрессии значим; – по утку $t_b < t_{крит} = 2,898$, следовательно, коэффициент регрессии незначим
\bar{A} , %	1,44	2,57	3,89	2,31	Значения 5–7% свидетельствуют о хорошем подборе уравнения регрессии
R^2	0,8429	0,8439	0,0046	0,3013	При содержании сухого наполнителя 50% в 84,29 и 84,39% случаев изменения E_d приводят к изменению σ_p . В остальных 15,71 и 15,61% случаев значения σ_p объясняются факторами, не учтенными в модели, случайными и статистическими ошибками. При содержании сухого наполнителя 30% в 0,46 и 30,13% случаев изменения E_d приводят к изменению σ_p . В остальных 99,54 и 79,87% случаев значения σ_p объясняются факторами, не учтенными в модели, случайными и статистическими ошибками
F	101,96	102,69	0,108	7,332	При содержании сухого наполнителя 50% значение $F > F_{табл} = 8,18$, следовательно, коэффициент детерминации значим. При содержании сухого наполнителя 30%: – по основе значение $F < F_{табл} = 7,88$, следовательно, коэффициент детерминации незначим; – по утку значение $F < F_{табл} = 8,4$, следовательно, коэффициент детерминации незначим

Результаты и обсуждение

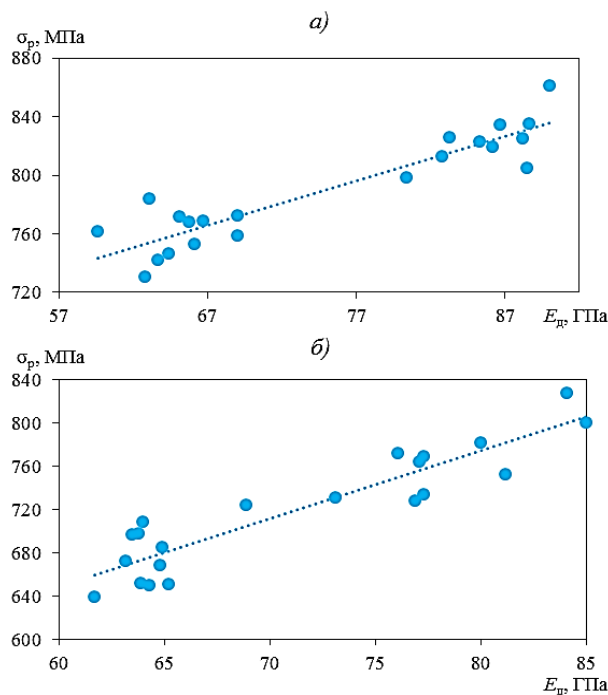
Сравнивая значения разброса параметров E_d и σ_p при содержании сухого наполнителя 50% по основе (соответственно 27 ГПа и 131 МПа) и утку (соответственно 22,4 ГПа и 188 МПа) с аналогичными значениями при содержании сухого наполнителя 30% по основе (соответственно 3,5 ГПа и 166 МПа) и утку (соответственно 11,6 ГПа и 99 МПа), наблюдаем больший разброс значений в образцах с 50%-ным содержанием сухого наполнителя. В то же время регрессионный анализ показал очевидную несостоятельность регрессионной модели при содержании сухого наполнителя 30%. Небольшой разброс значений σ_p в образцах совместно с небольшим разбросом значений E_d не позволяют рассчитать подходящее уравнение регрессии. Это означает, что при содержании сухого наполнителя 50% прибор ИМД-2003 и используемый метод определения E_d позволяют определять изменение значений σ_p намного точнее из-за широкого разброса значений переменной E_d и зависимой переменной σ_p . Вместе с тем при содержании 30% сухого наполнителя по основе, несмотря на широкий разброс значений 166 МПа, прибор не фиксирует большой разброс значений E_d , что возможно происходит из-за неучтенных в модели факторов и неспособности выразить их через измерение динамического модуля упругости E_d .

Принимая результаты при содержании сухого наполнителя 30% несостоятельными, при помощи регрессионного анализа рассчитаны уравнения зависимостей прочности при растяжении (σ_p) от динамического модуля упругости (E_d) при вырезке образцов в направлении основы и утка наполнителя. Уравнение регрессии имеет вид $y=bx+a$. На основании поля корреляции можно выдвинуть гипотезу о том, что связь между всеми возможными значениями E_d и σ_p носит линейный характер:

$$\sigma_{p(\text{основа})}=3,025E_d+562,44 \text{ (МПа)}, r=0,919; r_{\text{крит}}=0,549; \quad (1)$$

$$\sigma_{p(\text{уток})}=6,291E_d+270,631 \text{ (МПа)}, r=0,918; r_{\text{крит}}=0,549. \quad (2)$$

Результаты приведены на рисунке в виде зависимости $\sigma_p(E_d)$.



Зависимости динамического модуля упругости от прочности при растяжении углепластика КМУ-11тр в направлении основы (а) и утка (б)

Коэффициент регрессии b показывает на сколько единиц МПа в среднем изменяется значение σ_p при изменении E_d на 1 ГПа. Коэффициент a указывает на уровень значений σ_p , но только в том случае, если величина x находится близко к значениям E_d , использованным в модели. Именно поэтому важно включать в уравнение большое количество экспериментальных данных. При этом, чем шире диапазон значений E_d и σ_p , участвующих в модели, тем точнее выявленная связь (при ее наличии) и тем точнее будут рассчитаны значения искомой величины, даже если линия регрессии довольно точно описывает значения σ_p . В то же время, несмотря на точность полученного уравнения, если фактические значения σ_p и E_d находятся достаточно далеко от использованных в модели (или если нарушается взаимосвязь σ_p и E_d), то отсутствует гарантия точности расчета величины σ_p через значения E_d по данной конкретной модели. Таким образом, при достаточном количестве разнообразных экспериментальных данных, динамический модуль упругости может использоваться в качестве меры статического модуля упругости по уравнениям (1) и (2) при уровне значимости $\alpha=0,01$. В работе [14] на тех же материалах получены корреляционные зависимости с меньшей точностью, при этом испытано большее количество образцов. Там же упомянуто о пути улучшения точности зависимостей через введение в образцы дефектов для получения широкого разброса диагностируемых свойств. Данная работа подтверждает эффективность предложенного способа на примере исследуемых материалов, где вместо статического модуля упругости при растяжении взят параметр прочности при растяжении. Точность, выраженная в коэффициенте корреляции, возросла с 0,759/0,614 до 0,919/0,918 (в числителе – по основе; в знаменателе – по утку).

Заключения

Показаны возможность и важность метода повышения точности корреляционных уравнений при использовании результатов НК для расчета модуля упругости материала. Обозначены вопросы по исследованию неучтенных факторов при изменении прочности при растяжении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник, 2007. №5. С. 7–27.
2. Мурманский Б.Е. Разработка, апробация и реализация методов повышения надежности и совершенствования системы ремонтов паротурбинных установок в условиях эксплуатации: дис. докт. техн. наук. Екатеринбург, 2015. 457 с.
3. Машиностроение: энциклопедия в 40 т. / под общ. ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 1998. Т. IV-3: Надежность машин / под ред. В.В. Клюева. 592 с.
4. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. М: Стандартинформ, 2016. 28 с.
5. Композиционные материалы / под ред. Л. Браутмана, Р. Крока. М.: Машиностроение, 1978. Т. 7: Анализ и проектирование конструкций. Ч. 1 / под ред. К. Чамиса. 300 с.
6. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. №2. С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
7. Иосилевич Г.Б., Лебедев П.А., Стреляев В.С. Прикладная механика: для студентов втузов. М.: Машиностроение, 2012. 576 с.
8. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: учеб. для вузов. 10-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.

9. Бочкарева С.А. Оценка надежности конструкций из полимерных композиционных материалов с учетом разброса управляющих параметров: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2006. 21 с.
10. Мурашов В.В., Косарина Е.И., Генералов А.С. Контроль качества авиационных деталей из полимерных композиционных материалов и многослойных клееных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 65–70.
11. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // Пермские авиационные двигатели. 2014. №31. С. 43–47.
12. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
13. Генералов А.С., Мурашов В.В., Косарина Е.И., Бойчук А.С. Построение и анализ корреляционных связей для оценки прочностных свойств углепластиков реверберационно-сквозным методом // Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-1-58-63.
14. Истягин С.Е., Постнов В.И. К вопросу о корреляционной зависимости информативных параметров контроля при диагностике свойств ПКМ // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. №4 (2). С. 229–237.
15. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Троицкая Н.В. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2016. №1. С. 295–296.
16. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. М.: Машиностроение, 1980. 375 с.
17. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. М.: Изд-во МГУ, 1984. 336 с.
18. ГОСТ 56682–2015. Композиты полимерные и металлические. Методы определения объема матрицы, армирующего наполнителя и пустот. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.
19. ГОСТ 11262–2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2018. 24 с.