

# Метод снижения затрат на испытания полимерных композиционных материалов летательных аппаратов

Алиев Акпер Алиназар оглы, ведущий инженер-конструктор;

Ампилогов Алексей Юрьевич, начальник бригады.



## Актуальность

Одним из этапов сертификации воздушного судна (ВС) является определение расчётных значений механических характеристик полимерных композиционных материалов (ПКМ) посредством проведения соответствующих прочностных испытаний<sup>1</sup> (см. уровень «Образцы» на Рис. 1).

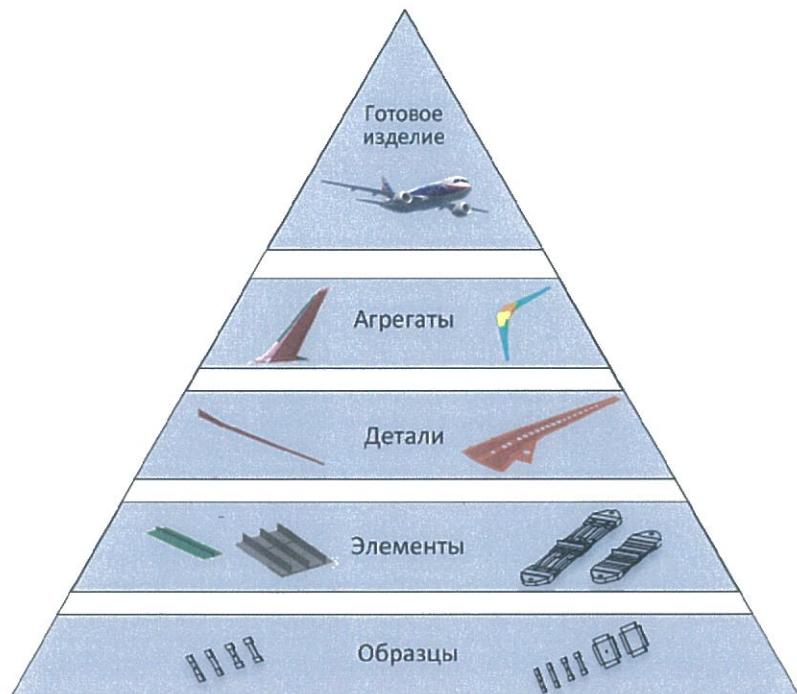


Рис. 1. Схема комплекса испытаний для демонстрации соответствия конструкции проектируемого изделия требованиям нормативных документов

Разнонаправленная ориентированность углеродных волокон в объёме детали из ПКМ придаёт им анизотропность. Совокупность направлений углеродных волокон  $\alpha_i^2$ , уложенных по толщине детали, называется *укладкой*. Особенностью ПКМ является то, что в различных зонах детали укладки

<sup>1</sup> Межгосударственный Авиационный Комитет. Авиационный регистр. Руководство 23-29М. Порядок оценки соответствия материалов, используемых в конструкции воздушного судна, требованиям Авиационных Правил. Москва, «Авиаиздат», 2009 г., 14 с.

<sup>2</sup>  $\alpha$  – угол направления углеродного волокна,  $i$  – порядковый номер слоя ПКМ

углеродных слоёв могут отличаться. Например, в композиционной панели крыла ВС имеется несколько зон (корневая, концевая, зона ниши шасси, зона навески двигателя, зоны дренажных отверстий и т.д.) с различными укладками. Этим обусловлена необходимость проведения исследований свойств ПКМ для зон детали с различными укладками.

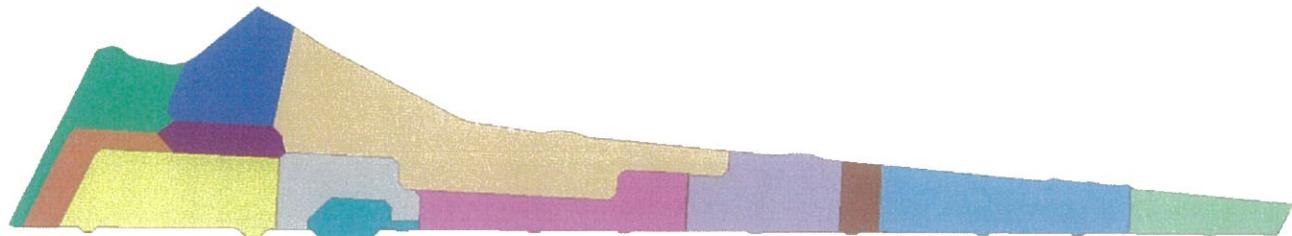


Рис. 2. Цветная схема расположения зон с разными укладками в панели крыла

Согласно рекомендациям<sup>3</sup>, для зоны с определённой укладкой требуется испытать не менее 1521 образца, включающих испытания на растяжение, сжатие, сдвиг в плоскости слоёв, межслоевой сдвиг, смятие, усталостные испытания с незаполненным отверстием, усталостные испытания на смятие и т. п.

Ориентировочная средняя стоимость изготовления и испытания одного образца ПКМ составляет  $\sim 15$  тыс. руб.<sup>4</sup>, соответственно затраты на испытания только одного вида укладки превышают 22,8 млн. руб. Учитывая, что общее количество укладок ПКМ перспективного летательного аппарата может превышать сотни единиц, их суммарные расходы на прочностные испытания превысят **2,28 млрд. руб.**.

Приведённые расчёты стоимости работ по проведению испытаний показывают необходимость разработки и научного обоснования метода, позволяющего снизить количество испытаний (образцов).

**Целью** настоящей работы являлась разработка и обоснование метода снижения расходов на проведение прочностных испытаний полимерно-композиционных материалов (ПКМ) применяемых в отечественных перспективных летательных аппаратах путём минимизации количества образцов.

<sup>3</sup> РЦ-25.613 «Порядок и процедуры разработки методов определения соответствия неметаллических материалов и элементов конструкции из ПКМ требованиям АП (п.613) при проведении сертификации воздушного судна»

<sup>4</sup> по состоянию на 2020 г.

## Задачи

Для рационального сокращения номенклатуры исследуемых укладок (и, как следствие, количества образцов) при соблюдении требований нормативных документов<sup>5</sup> проводится оптимизация полного перечня укладок на основе предлагаемых подходов:

- Выявление среди полного перечня ПКМ т. н. «пакетных» укладок, состоящих из определённой последовательности слоёв препрода, повторяющейся кратное число раз  $n$  ( $[\alpha_i]_n$ ). Пакетные укладки обладают одинаковым относительным (процентным) содержанием слоёв;
- Проведение испытаний образцов по аттестованным стандартным методикам, в т.ч. с учетом требований к их толщине.

## Сущность метода

Научной основой предлагаемого подхода является «обобщённый метод ячеек» (*generalized method of cells*, GMC)<sup>6</sup> или метод «повторяющихся элементарных ячеек» (*repeating unit cell*, RUC), применяющийся NASA для прогнозирования упругих свойств ПКМ ОСЭ аэрокосмических конструкций. Сущность данного подхода может быть показана на примере слоистого ПКМ со структурой «поленница» (*woodpile structure*)<sup>7</sup>, в которой выявляется повторяющийся фрагмент объёма – регулярная элементарная ячейка (РЭЯ), образующая трёхмерную периодическую мезоструктуру материала (Рис. 3).

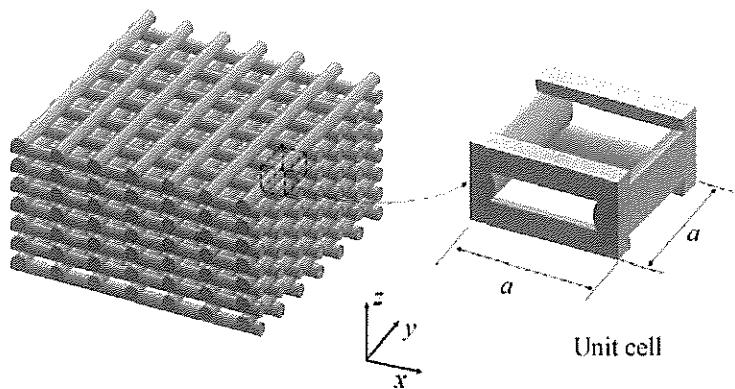


Рис. 3. Упрощённая иллюстрация структуры слоистого ПКМ как множества регулярных элементарных ячеек

<sup>5</sup> РЦ ПКМ1-(107В) «Авиаконструкция из композиционных материалов», ФГУП «ЦАГИ», 2012 г.

<sup>6</sup> Brett A. Bednarcyk, Steven M. Arnold. Micromechanics-Based Modeling of Woven Polymer Matrix Composites. AIAA journal, vol. 41, No. 9, September 2003, p. 1788-1796

<sup>7</sup> Cuan-Urquiza et al. Characterization of the Mechanical Properties of FFF Structures and Materials: A Review on the Experimental, Computational and Theoretical Approaches. Materials 2019, 12, 895

Исходя из допущения равенства напряжений и относительных деформаций по толщине, усреднённые («гомогенизированные») физико-механические свойства РЭЯ применяются для дальнейшего использования в конечно-элементном моделировании ортотропных ПКМ в макромасштабе<sup>8, 9, 10</sup>.

Важным преимуществом метода является использование сравнительно простых зависимостей «структура – свойства», «нагрузка – деформация» полученных на РЭЯ для прогнозирования свойств большого количества различных макроразмерных структур на основе данной ячейки<sup>11,12</sup>.

Основным недостатком метода, помимо очевидного обязательного наличия в структуре повторяющегося фрагмента, является использование теоретических (т. е. завышенных) физико-механических свойств РЭЯ и его применимость лишь к геометрически простым объектам.

Регуляризация структуры при определении упругих констант материала приводит к неизбежным погрешностям, вызванным отклонением идеальной модели от реальной структуры из-за наличия в последней концентраторов напряжений в виде локальных разрывов волокон, расслоения и т. п. Например, экспериментальное исследование образцов ПКМ разной толщины с идентичной РЭЯ показало существенное различие в значениях поперечного модуля упругости (transverse modulus)<sup>13,14</sup>.

В этой связи, эффективность такого подхода напрямую зависит от степени учёта реальных свойств элементарного фрагмента и повреждений структуры ПКМ на более высоком уровне.

<sup>8</sup> Aboudi, J., Mechanics of Composite Materials: A United Micromechanical Approach, Elsevier Science, New York, 1991

<sup>9</sup> Paley, M., and Aboudi, J., “Micromechanical Analysis of Composites by the Generalized Cells Model,” Mechanics of Materials, Vol. 14, 1992, pp. 127-139

<sup>10</sup> Aboudi, J., “Micromechanical Analysis of Thermo-Inelastic Multiphase Short-Fiber Composites,” Composites Engineering, Vol. 5, No. 7, 1995, pp. 839-850

<sup>11</sup> Cuan-Urquiza, E.; Bhaskar, A. Flexural elasticity of woodpile lattice beams. Eur. J. Mech. A Solids, 2018, 67, 187–199

<sup>12</sup> Norato, J.A.;Wagoner Johnson, A.J. Computational and cellular solids approach to the stiffness-based design of bone scaffolds. J. Biomech. Eng. 2011, 133, 91003

<sup>13</sup> Тарнопольский Ю. М. и др. Пространственно-армированные композиционные материалы: Справочник /Ю. М. Тарнопольский, И. Г. Жигун, В. А. Поляков – М.: Машиностроение, 1987.—224 с.: ил.

<sup>14</sup> Cater et al. Single Ply and Multi-Ply Braided Composite Response Predictions Using Modified Subcell Approach. J. Aerosp. Eng. 2015.28, 04014117-1-12

## *Адаптированный метод*

В отличие от методик, основанных на периодических микро- и мезоразмерных фрагментах, анализ схем армирования слоистых ПКМ позволяет выделить в их структуре значительно более масштабные регулярные элементы – макроразмерные «блоки» в виде повторяющейся совокупности из нескольких плоских пакетов волокон с различными направлениями укладки (Рис. 4).

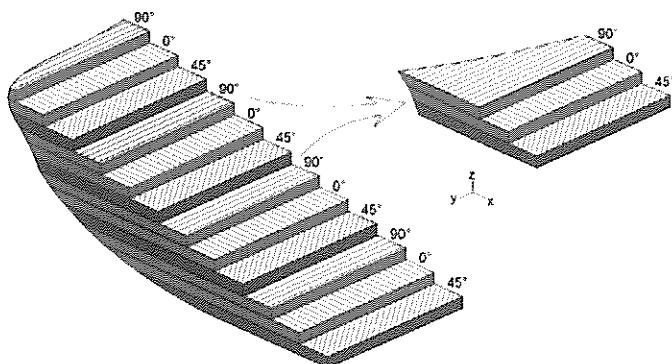


Рис. 4. Пример слоистого ПКМ с повторяющейся макроячеистой укладкой, состоящей из четырёх трёхслойных пакетов  $[45^\circ/0^\circ/90^\circ]_4$

Использование фактических характеристик прочности макроразмерного блока в качестве масштабируемого регулярного элемента позволит более полно учесть технологические недостатки реального производства и вырезки самих образцов ПКМ, выражаящихся в распределении структурных дефектов по объёму материала.

Для разработки метода были проведены исследования укладок углепластиков современного ВС с толщиной монослоя 0,19 мм, изготовленных по инфузионной технологии в ламинатные панели разной толщины с одинаковым процентным содержанием укладки волокон (Табл. 1).

Табл. 1 – Исследованные укладки с пакетным расположением слоёв

№ п/п	Обозначение укладки	Толщина, мм	Процентное содержание укладки волокон, $[0^\circ; \pm 45^\circ; 90^\circ]$ , %	Кол-во пакетов в блоке
1	45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/ 45/0/-45/0/90/0/-45/0/45	5,13 (27 слоёв)	44/44/12	3
2	45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/ 45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/ 45/0/-45/0/90/0/-45/0/45	8,55 (45 слоёв)	44/44/12	5
3	45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/ 45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/ 45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/45/0/-45/0/90/0/-45/0/45/ 45/0/-45/0/90/0/-45/0/45	11,97 (63 слоя)	44/44/12	7

Укладки в Табл. 1 состоят из нескольких пакетов  $[45/0/-45/0/90/0/-45/0/45]_n$ , толщиной 1,71 мм каждый и кратностью  $n=3, 5$  и 7 повторений соответственно.

Наибольшее число дефектов может содержать блок с максимальной кратностью (в нашем случае  $[45/0/-45/0/90/0/-45/0/45]_7$ , 11,97 мм), наименьшее – с минимальной ( $[45/0/-45/0/90/0/-45/0/45]_3$ , 5,13 мм) поэтому их целесообразно выбрать в качестве исследуемых.

Для подтверждения предположения о закономерности изменения основных механических характеристик статической прочности для всех трёх укладок с кратной толщиной были использованы результаты соответствующих испытаний (Табл. 2).

Табл. 2 – Виды и количество экспериментальных исследований

Вид испытания	Метод ASTM	Характеристики	Кол-во образцов, шт.
Растяжение	D 3039	$\sigma_+, E_+$	884
Сжатие	D 6641	$\sigma_-, E_-$	1783
Сдвиг в плоскости укладки	D 7078	$\tau_{I2}, G_{I2}$	2213
Межслоевой сдвиг	D 2344	$\tau_{I3}$	934
Смятие	D 5691	$\sigma_{cm}$	498
Сжатие с незаполненным отверстием	D 6484	$\sigma_{-HO}$	994
ИТОГО:			7306

Образцы представляли собой партии из пластин ламината с габаритными размерами, соответствующими испытательной методике. Испытания образцов проводились при комнатной температуре в сертифицированных лабораториях.

Статистическая обработка полученных результатов осуществлялась с определением среднего значения характеристик прочности и жёсткости. Однородность полученных данных оценивалась по коэффициенту вариации ( $CI$ ), допустимые значения которого определяются «вилкой Хилла<sup>15</sup>».

Анализ, проведённый на 7306 образцах, показал, что имеется устойчивая зависимость механических свойств ПКМ от количества повторений пакетов (Рис. 5):

<sup>15</sup> Заданные минимальные и максимальные численные значения напряжений и модулей упругости при флюктуации свойств

- монотонное возрастание жесткостных свойств ( $E_+$  и  $E_-$ ),
- монотонное убывание прочностных свойств ( $\sigma_+$ ,  $\sigma_{cm}$ ,  $\sigma_-$ ,  $\sigma_{HO}$ ,  $\tau_{12}$ ,  $\tau_{13}$ ), при увеличении повторений пакетов.

Поведение одного свойства  $G_{12}$  – формально не удовлетворяет указанной выше зависимости: при увеличении повторений пакетов свойство монотонно убывает на 1% при каждом повторении пакета. Это позволяет упростить прогноз значений свойства  $G_{12}$  с помощью поправки: при изменении количества пакетов на  $n$ , значение свойства также изменяется на  $n\%$ <sup>16</sup>.

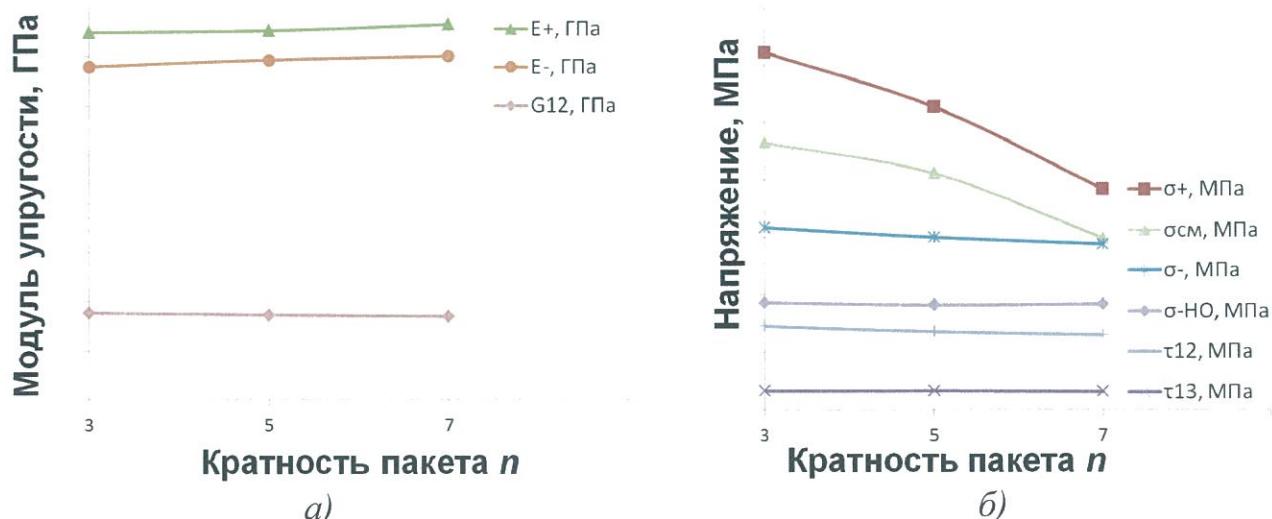


Рис. 5. Зависимость некоторых механических свойств ПКМ от кратности  $n$  укладки: а) модули упругости ( $E_+$  – модуль упругости на растяжение;  $E_-$  – модуль упругости на сжатие,  $G_{12}$  – модуль сдвига); б) напряжения ( $\sigma_+$  – прочность при растяжении,  $\tau_{13}$  – прочность при сдвиге перпендикулярно плоскости слоёв,  $\sigma_-$  – прочность при сжатии,  $\tau_{12}$  – прочность при сдвиге в плоскости слоёв,  $\sigma_{cm}$  – прочность при смятии,  $\sigma_{HO}$  – сжатие с незаполненным отверстием)

Наличие монотонных зависимостей для всех изученных свойств, подтверждённых на статистически значимом количестве образцов, а также простые (во многих случаях – линейные) зависимости дают практическую возможность точного прогнозирования механических свойств для одних пакетных укладок на основе экспериментальных данных по укладкам с другим количеством аналогичных повторяющихся пакетов.

## Результаты

При допущении линеаризации, т. е. приведения экспериментальных данных по минимальной ( $n=3$ ) и максимальной ( $n=7$ ) точкам к зависимости вида  $y=kn+b$

<sup>16</sup> Несмотря на простой способ реализации указанной поправки, выявленная особенность изменения  $G_{12}$  требует дальнейшего изучения

( $y$  – исследуемое свойство,  $n$  – кратность пакета) было установлено, что для исследуемого диапазона пакетных укладок прогнозируемые значения (для  $n=5$ ) совпадают с экспериментальными в пределах 7% погрешности (Рис. 6).

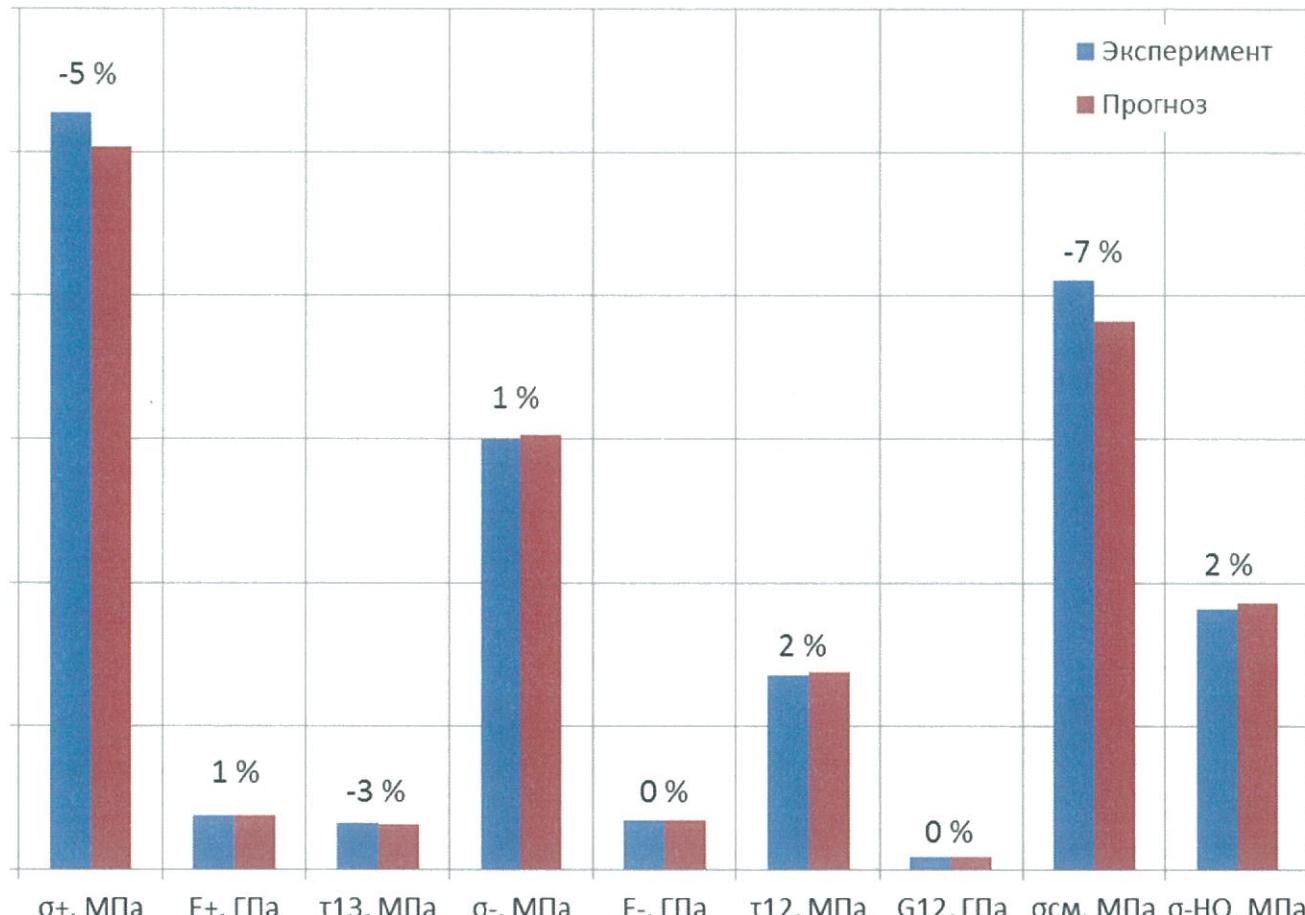


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и прогнозируемых значений характеристик прочности для укладки с кратностью пакета  $n=5$  (погрешности показаны над столбцами гистограммы)

Полученный результат позволяет утверждать, что для множества используемых в конструкции ВС ПКМ с идентичной пакетной укладкой необходимо выбрать две укладки (с минимальной и максимальной толщиной, пригодной для натурных испытаний) для полного экспериментального исследования механических свойств, а для остальных ПКМ значения этих свойств могут быть получены по предлагаемому в данной работе методу, с экспериментальным подтверждением правильности прогноза на сокращённом количестве испытываемых образцов.

Выбранные укладки охватывают весь диапазон типичных структурных дефектов, неизбежно возникающих в реальных условиях технологического

процесса и снижающих физико-механические свойства материала. Отсюда следует, что результаты испытаний многопакетного материала позволят в полной мере получить характерный разброс значений механических характеристик и наиболее корректно оценить расчётные характеристики.

При масштабной реализации предлагаемого подхода, полученные экспериментальные данные, основанные на большом количестве испытаний, снижают затраты до **5 (!)** раз (Табл. 3, Рис. 7).

Табл. 3 – Показатели эффективности традиционной и новой методик

Сравнительный параметр	Укладки, шт.	Образцы, шт.	Затраты, млн руб.	Вариант
Общее количество укладок:	135	122805	1842	«БЫЛО»
- из них квалифицируемых с учётом предлагаемого метода	27	26577	399	«СТАЛО»
Итоговый экономический эффект, млн руб.			<b>1443</b>	



Рис. 7. Сравнение эффективности традиционной и новой методики

## ***Перспективы***

Предложенный метод сокращения затрат за счёт исключения фактически многократно дублирующихся испытаний образцов может быть использован для следующих мероприятий по обеспечению безопасности конструкции ВС:

- сопровождение производства деталей и агрегатов;
- определение механических свойств основных силовых элементов;
- подбор укладок ПКМ при проектировании новых изделий и т.п.

Метод также может быть использован в смежных отраслях промышленности: космической, автомобильной, судостроительной и т.д. при изучении механических свойств конструкций из ПКМ.