

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ИМИТАТОРОВ ЛЬДА ИЗ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Г.Т. Андреев (ФГУП «ЦАГИ»), В.В. Внук (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН), А.В. Левицкий, П.М. Николаев, А.А. Никуленко, А.О. Шардин, А.А. Юстус (ФГУП «ЦАГИ».)

Для оценки влияния обледенения на аэродинамику самолета необходимым этапом являются испытания моделей в аэродинамических трубах с накладками, имитирующими лед. В работе описываются технологические особенности изготовления таких накладок в аддитивной технологии – стереолитографии. Описаны особенности стереолитографических установок, проведена экспериментальная оценка механических свойств образцов, изготовленных из нескольких типов фотополимеров с целью выбора оптимального по характеристикам материала. Оценивалось оптимальное расположение модели в рабочей зоне стереолитографической установки и его влияние на геометрическую точность детали¹.

Ключевые слова: самолет, обледенение, имитатор льда, технология изготовления, стереолитография, фотополимер, механические свойства.

Введение

В качестве основного технологического процесса для изготовления имитаторов льда, исходя из специфических требований к таким деталям, была выбрана технология послойного синтеза – стереолитография. В этой технологии деталь изготавливается из жидкого светочувствительного фотополимера путем его послойного отверждения под действием ультрафиолетового света. К достоинствам этого способа относятся: высокое качество внешних поверхностей, геометрическая точность и относительно небольшое время изготовления. Имитаторы льда из фотополимера используются для экспериментальных исследований в составе аэродинамической модели самолета для оценки влияния льда на характеристики устойчивости и управляемости. Они устанавливаются на переднюю кромку крыла или горизонтального оперения. Режимы испытаний, необходимость соблюдения заданной аэродинамической профилировки, обеспечение возможности смены деталей во время аэродинамического эксперимента, обуславливают особые требования как к конструкции деталей, так и к характеристикам материала, а также требуют отработки технологии изготовления имитаторов льда на конкретной стереолитографической установке.

Конструктивные особенности имитаторов обледенения

В зависимости от условий проведения эксперимента по оценке влияния обледенения на аэродинамические характеристики летательного аппарата существенным образом меняются требования к конструкции имитаторов льда. Эксперимент может проводиться как в летных испытаниях, на натуральных образцах авиационной техники, так и в экспериментальных исследованиях в аэродинамических трубах (АДТ) на масштабных моделях летательных аппаратов. Описываемые в работе результаты исследований относятся к изучению обледенения в АДТ.

Исследования в АДТ моделей с установленными на них имитаторами льда и последующий анализ экспериментальных результатов могут проводиться как часть сертификационных испытаний [1, 2] одним из следующих методов:

- на крупномасштабных моделях-макетах самолетов с имитаторами льда, выполненных в масштабе $M = 1: (2...3)$ в натурной аэродинамической трубе типа Т-101 ЦАГИ;
- на моделях натуральных частей самолетов (натурное хвостовое оперение, натурный отсек крыла, натурная силовая установка) в натурной аэродинамической трубе типа Т-101 ЦАГИ;
- на моделях частей самолетов (хвостовое оперение, полукрыло с механизацией) в малых аэродинамических трубах типа Т-102, Т-103 ЦАГИ;
- на малых исполнительных моделях самолетов в АДТ ЦАГИ с закрытой рабочей частью при повышенном давлении (при повышенных числах Re до $(3...5) \cdot 10^6$);
- путем инженерного анализа результатов и последующего математического моделирования.

Для представленных методов становится возможным сформулировать обобщенные требования к конструкции имитаторов обледенения:

- внешняя, аэродинамическая форма имитатора должна быть максимально близкой к математической модели (как геометрически, так и по распределению неровностей) [3,4];
- конструкция деталей, имитирующих обледенение, должна обеспечивать возможность многократной установки-снятия с исследуемой модели;
- способ установки на аэродинамическую модель должен обеспечивать оперативную замену разных типов имитаторов льда с наименьшими временными затратами;
- механические свойства материала имитатора льда (предел прочности, модуль упругости) должны обеспечивать сохранение геометрической формы детали при растягивающих, изгибных и комбинированных нагрузках,

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13009.



Рис. 1. Предел прочности при растяжении

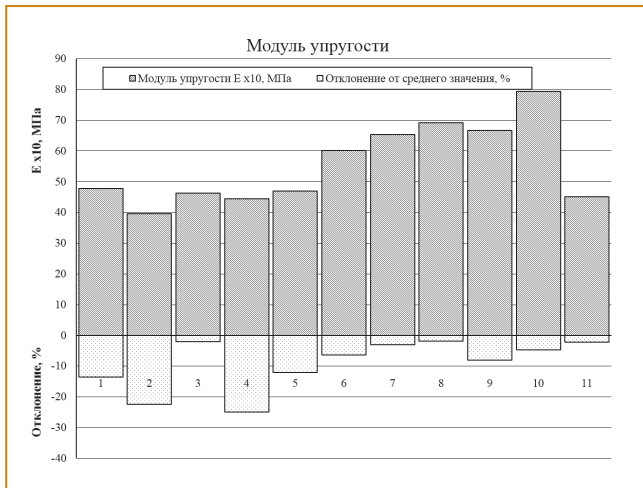


Рис. 2. Модуль упругости при растяжении

возникающих при экспериментальных исследованиях в АДТ.

Соответствие изготовленного имитатора льда изложенным требованиям возможно только при условии решения следующих технических задач:

- выбор оптимальной стереолитографической технологии изготовления имитаторов, приводящей к минимальным искажениям формы;
- выбор фотополимерного материала, обеспечивающего однородность конструкции (отсутствие внутренних концентраторов) и в тоже время обладающего необходимым уровнем механических характеристик;
- отработка рациональной технологии изготовления деталей из фотополимера.

Выбор стереолитографической технологии для изготовления имитаторов

На сегодняшний день на рынке представлены два типа стереолитографических установок – лазерная стереолитография (SLA) и ее разновидность – светодиодное цифровое проецирование (DLP).

Лазерная стереолитография [5, 6] дает высокую точность (от 15 мкм) и достаточно высокую скорость изготовления изделий при приемлемой стоимости. SLA-процесс основывается на «послойном синтезе» изделия: при его проведении исходная математическая

модель делится компланарными секущими плоскостями на слои. При проведении синтеза (изготовления) изделия формируется начальный слой, затем к нему добавляется следующий слой и так далее до завершения процесса. Для засветки сечения формируемого изделия на основе математической модели определяется его внешний и внутренний контуры. Строится траектория лазерного луча, ометающего сечение, и готовится управляющая программа для стереолитографической установки. Для обеспечения оперативности сканирования сечения лазерным лучом в установках вместо традиционных линейных перемещений инструмента, применяемых в оборудовании с ЧПУ, используется угловое перемещение зеркала.

Светодиодное цифровое проецирование основано на применении поля двухпозиционных отражающих элементов (зеркал). Микроэлектромеханическая система управляет зеркалами, устанавливая их в одно из двух состояний: «зеркало» – отраженный свет проходит через жидкий полимер, «радиатор» – зеркало поглощает свет, препятствуя отверждению полимера. Печать выполняется послойно, с минимальной толщиной слоя 10 мкм. Особенностью DLP-установок является использование матрицы для формирования изображения, описывающего отверждаемый слой. При этом ключевым фактором является физическое разрешение матрицы – при невысоких значениях разрешения, контур отверждаемого слоя будет менее точным, по сравнению со SLA установкой. Вместе с тем, скорость печати DLP-установки более высокая или сопоставимая с существенно более дорогими высокопроизводительными SLA-принтерами. Исходя из рассмотренной совокупности характеристик, наиболее предпочтительной установкой для изготовления имитаторов обледенения является DLP-принтер. Использование DLP-установок с матрицами высокого разрешения позволяет получать приемлемые параметры геометрической точности получаемых изделий. Наряду с этим такие установки при относительно низкой стоимости обладают высокими параметрами производительности – скорости печати.

Механические свойства фотополимерных материалов

Для сравнения свойств изделий, изготовленных на двух разных стереолитографических установках (SLA и DLP), были получены образцы из различных фотополимерных материалов. Испытания проводились для исследования двух характерных свойств – прочности при растяжении и модуля упругости.

На SLA-установке были изготовлены образцы из материалов «ИПЛИТ-3» и «ИПЛИТ-4», композиции для которых разрабатывались ИПЛИТ РАН (г. Шатура) совместно с НИЦ «Курчатовский институт»-ВИАМ (Москва) и ООО «Мономер» (г. Дзержинск) [6].

На DLP-установке были изготовлены образцы из ряда материалов, поставляемых на отечественном рынке компанией ООО «ХАРЦ Лабс» (Москва).

Таблица 1. Растяжение. ГОСТ 11262-2017

	Материал		Прочность при растяжении σ_{\max} , МПа	Отклонение от среднего значения, %	Условный предел текучести σ_y , МПа	Отклонение от среднего значения, %	Модуль упругости E, МПа	Отклонение от среднего значения, %
1	ИПЛИТ-3, вертикальные	Среднее	11,47		-		477,8	
		Минимум	8	30,2	-		413,3	13,5
2	ИПЛИТ-3, горизонтальные	Среднее	8,107		11,15		395,6	
		Минимум	6,8	16,1	11,15		306,7	22,34
3	ИПЛИТ-4, вертикальные	Среднее	19,91		19,27		444,5	
		Минимум	16,75	15,87	19		333,3	25
4	ИПЛИТ-4, горизонтальные	Среднее	12,47		8,512		463	
		Минимум	10,68	14,3	6,43		454,1	2
5	Dental Beigh, вертикальные	Среднее	14,08		12,44		469,3	
		Минимум	10,54	25	8,74	29	413,1	12
6	Dental Beigh, горизонтальные	Среднее	19,82		17,34		601,55	
		Минимум	14,77	25,4	10,92	37	563,7	6,29
7	Model Resign Grey, вертикальные	Среднее	23,94		21,85		652,67	
		Минимум	22,9	4,3	19,33	11,5	632,3	3,1
8	Model Resign Grey, горизонтальные	Среднее	26,63		24,46		692,47	
		Минимум	26,01	2,3	24,08	1,5	679,4	1,9
9	Industrial ABS Black, вертикаль- ные	Среднее	40,85		40,27		666,07	
		Минимум	39,94	2,2	39,51	1,9	612,2	8,08
10	Industrial ABS Black, горизон- тальные	Среднее	40,6		40,51		794,2	
		Минимум	38,67	4,7	38,02	6,1	756,6	4,7
11	Model Resign, горизонтальные	Среднее	18,13		16,77		451,67	
		Минимум	17,74	2,1	16,14	3,75	441,5	2,25

Испытания на растяжение проводились в соответствии с ГОСТ 11262-2017 для образцов, выращенных при вертикальном и горизонтальном способе ориентации в рабочей зоне установки (таблица).

На рис. 1 и 2 представлены диаграммы зависимости предела прочности при растяжении, модуля упругости для испытанных материалов и предельных отклонений их значений в % (значения представлены ниже оси, проходящей через «0»). Номера столбцов диаграмм соответствуют порядковым номерам образцов, представленных в таблице.

Из анализа таблицы и диаграмм видно, что минимальный разброс характеристик при достаточно высоких параметрах жесткости и прочности дают образцы из материала «Model Resign Grey» (столбцы 7 и 8 диаграммы). Так же, высокий результат показывает «Industrial ABS Black» (столбцы 9 и 10). Однако этот пластик имеет существенно большее время отверждения, худшую шероховатость поверхности и, при

использовании в массивных изделиях, склонен к образованию внутренних каверн.

Зависимость качества образцов от способа изготовления

С целью отработки рациональной технологии выращивания, в первую очередь оценивалось влияние направления выращивания на геометрические параметры получаемых деталей – форму и размер. Известно, что оптимальное расположение детали на платформе кардинальным образом может изменить точность изготовления в лучшую сторону [7]. Для испытаний были изготовлены образцы двух типов – «брус» (параллелепипед) и образцы с «талией». Исходя из простой формы образцов, для оценки точности изготовления были выбраны два способа расположения их на платформе – «горизонтальный» (длинная грань образца параллельна платформе) и «вертикальный» (длинная грань образца перпендикулярна платформе).

Было изготовлено по 10 образцов из каждого типа материала, различавшиеся только ориентацией в рабочей зоне стереолитографической машины: 5 - «горизонтально» и 5 - «вертикально».

Образцы «с талией» изготавливались с поперечным сечением 8×6 мм. Размеры образцов типа «брус» - 100×20×15 мм. Замеры производились в трех сечениях для каждого образца каждой серии.

Параметром оценки качества изготовления являлось относительное среднее линейное отклонение геометрического размера сечения.

В целом, лучшую точность для массивных образцов (типа «брус») показал материал Model Resign Grey. Отклонение геометрических параметров образцов от базовых значений составило 0,53×0,78 % для изготовленных «вертикальным способом» и 0,75×1,3 % для изготовленных «горизонтальным способом».

Для тонких образцов (сечение 8×6 мм) лучшую геометрическую точность показал материал Industrial ABS Black. Соответствующие отклонения геометрии от базовых параметров составили 0,75×0,83 % для образцов, изготовленных «вертикальным способом», и 2,0×0 % при изготовлении «горизонтальным способом».

Вероятными причинами искажения формы являются растягивающее усилие, которое испытывает изделие в момент отрыва от платформы в каждом из циклов подъема, деформация изделия при отделении от платформы и деформация из-за внутренних напряжений, которые возникают при отверждении фотополимера во внутренних полостях изделия во время финальной засветки.

Заключение

При использовании фотополимеров для изготовления деталей сложной формы, таких как имитаторы обледенения, необходимо выбирать материал исходя из его физических характеристик в соответствии с заданными нагрузками. По совокупности характеристик, таких как предел прочности при растяжении, модуль упругости и минимальный разброс характеристик, оптимальным материалом для изготовления имитаторов льда является фотополимер Model Resign Grey. Принимая во внимание время изготовления, предпочтительным способом является DLP-установка.

Кроме этого, необходимо четко представлять возможные искажения формы изделия в зависимости от расположения в рабочей зоне установки и проводить дополнительные мероприятия по их устранению или минимизации. Возможными решениями исключения искажения формы изделия являются:

- оптимальное расположение детали на платформе;
- увеличение числа поддержек при выращивании модели;
- изменение временных промежутков последовательности «засветка-подъем-засветка»;
- введение дополнительных конструктивных элементов (подошва, стенка, ребро и т.д.), которые будут способствовать сохранению формы изделия в момент отрыва от платформы.

Список литературы

1. Микеладзе В.Г., Андреев Г.Т., Мельничук Ю.П. Исследования влияния и имитаторов наземного обледенения на аэродинамические характеристики натурного полукрыла самолета Як-40 в АДТ Т-101 ЦАГИ // XII школа-семинар «Аэродинамика летательных аппаратов» НИО 2 ЦАГИ. — М., 2001.
2. Андреев Г.Т., Кощеев А.Б. и др. Предложения по проведению сертификации гражданских самолетов в условиях обледенения на основе анализа результатов трубных и летных испытаний самолетов семейства «Ту-204» с имитаторами льда // XVI школа-семинар «Аэродинамика летательных аппаратов» НИО 2 ЦАГИ. — М., 2005.
3. Левицкий А.В., Николаев П.М., Никуленко А.А., Шардин А.О., Юстус А.А. Система автоматизированного моделирования имитаторов льда для аэродинамических моделей летательных аппаратов // Автоматизация в промышленности. 2020. № 9. С. 45-48.
4. Николаев П.М., Внук В.В., Левицкий А.В., Шардин А.О. Моделирование шероховатой поверхности для задач изготовления имитатора льда // Естественные и технические науки. — 2020. — № 9 (147). — С. 143-149.
5. Евсеев А.В., Камаев С.В., Коцюба Е.В. и др. Лазерные технологии быстрого прототипирования и прямой фабрики трехмерных объектов. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. Под ред. Панченко В.Я. М: ФИЗМАТЛИТ, 2009. С.333-397.
6. Внук В.В., Камаев С.В., Марков М.А., Чербыло С.А. Особенности изготовления моделей из многокомпонентных фотополимеров методом лазерной стереолитографии. Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН — филиал ФГУ «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» РАН», г. Шатура, РФ.
7. Navarro J., Din M., Janes M.E., Swayambunathan J., Fisher J.P., Dreher M.L. Effect of print orientation on microstructural features and mechanical properties of 3D porous structures printed with continuous digital light processing // Rapid Prototyping Journal, Vol. 25 No. 6, 2019, pp. 1017-1029.

Андреев Геннадий Тимофеевич — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник,

Левицкий Александр Вячеславович - инженер-конструктор I категории,

Николаев Прокопий Михайлович — д-р техн. наук начальник отдела,

Никуленко Алексей Алексеевич - ведущий инженер-конструктор, *Шардин Антон Олегович* - начальник отдела,

Юстус Александр Анатольевич - ведущий инженер ФГУП «ЦАГИ»,

Внук Вячеслав Владимирович - младший научный сотрудник ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

Контактный телефон (495) 556-26-62.

E-mail: prokopy.nikolaev@tsagi.ru