

Перспективы применения аддитивных технологий в конструкции планера летательного аппарата

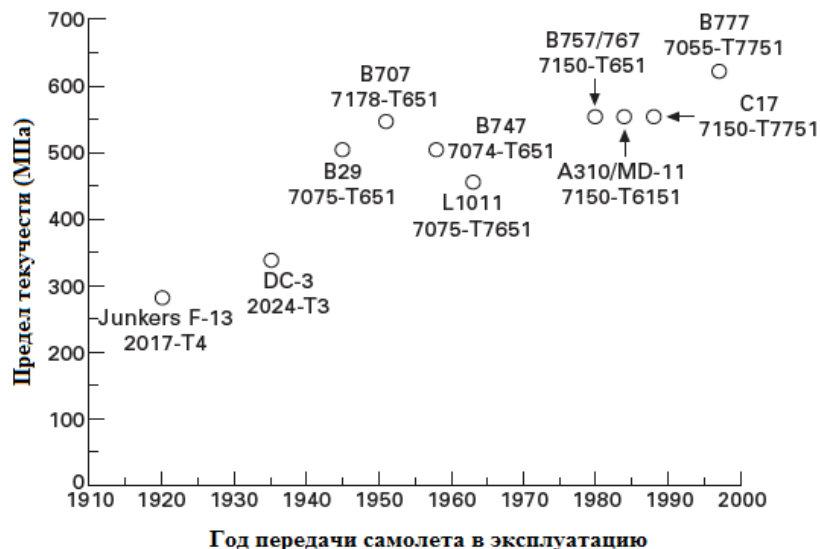
М.Ч. Зиченков, А.А. Свиридов, В.Д. Вермель, А.В. Панков

ФАУ «ЦАГИ»

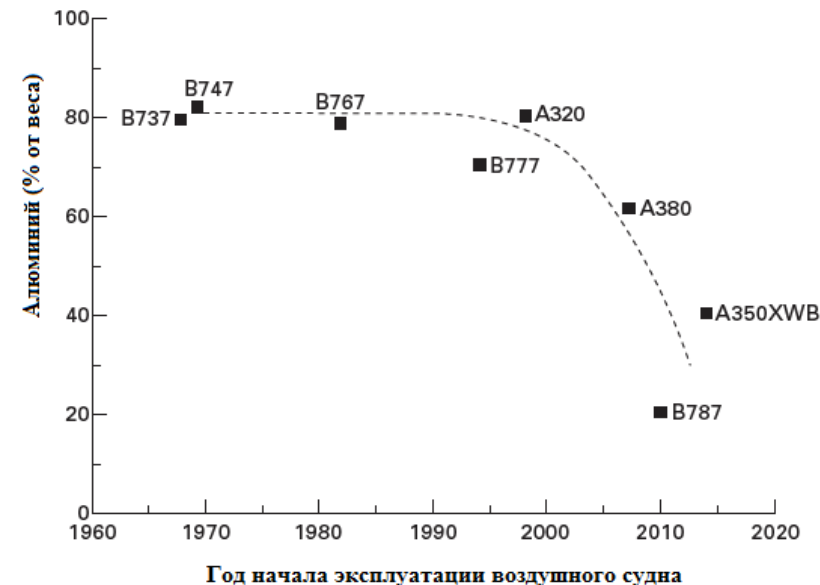
Москва 2025



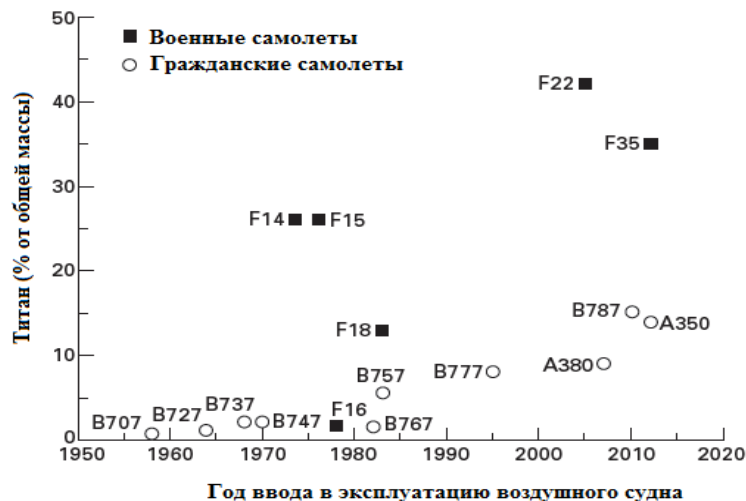
Тренды по внедрению материалов



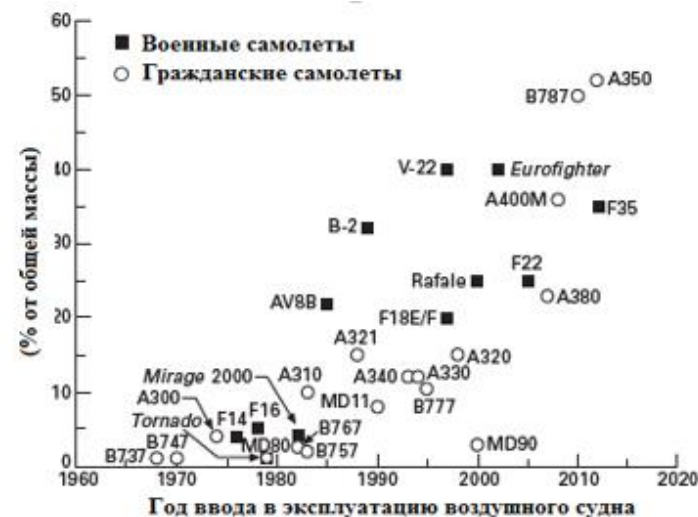
Рост предела текучести для алюминиевых сплавов



Снижение алюминия в общей массе самолета



Увеличение применения титановых сплавов



Увеличение доли композиционных материалов

Система обеспечения прочности авиационных конструкций

Экспериментальные исследования

Расчетные исследования



$$\sigma^* = [\sigma] \times k_1 \times k_2 \times k_3 \dots \dots \dots$$

$$T = \frac{N_{пол}}{\eta_{\Sigma}}$$

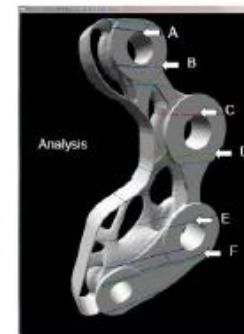
$$\eta = F(SlgN)$$

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

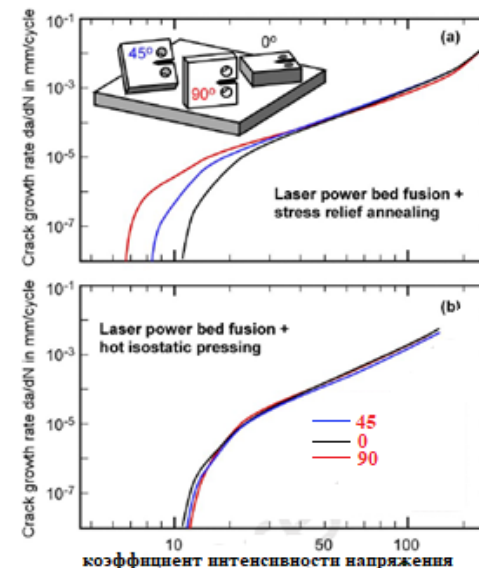
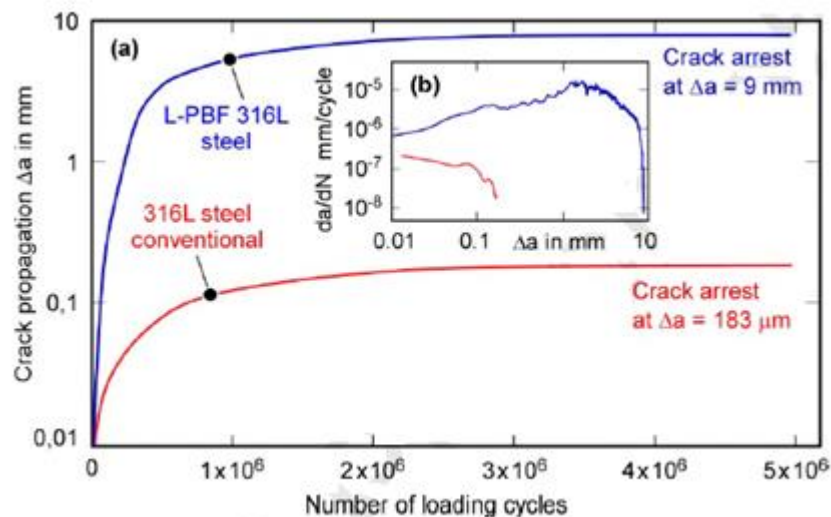
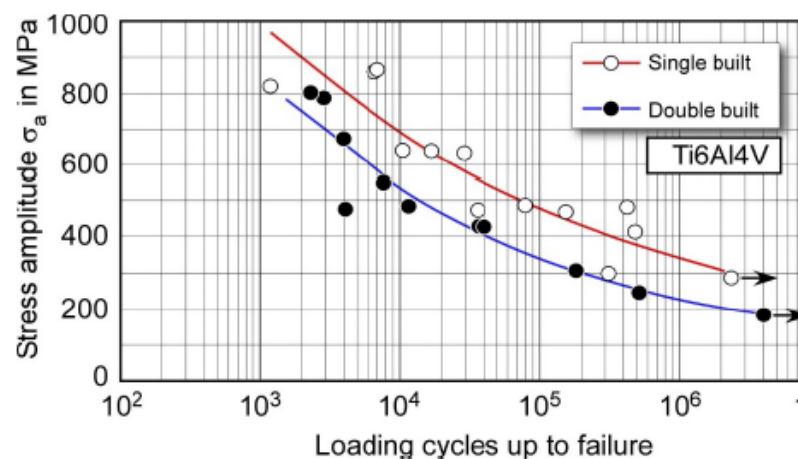
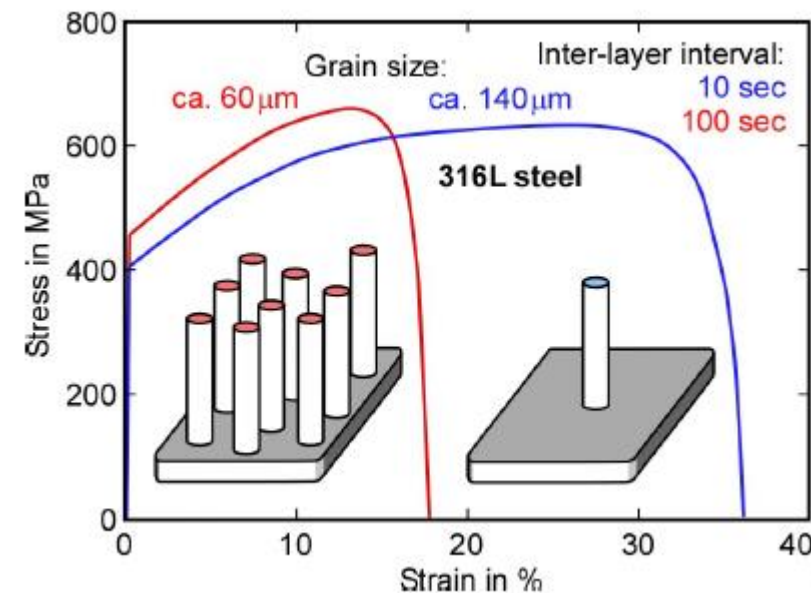
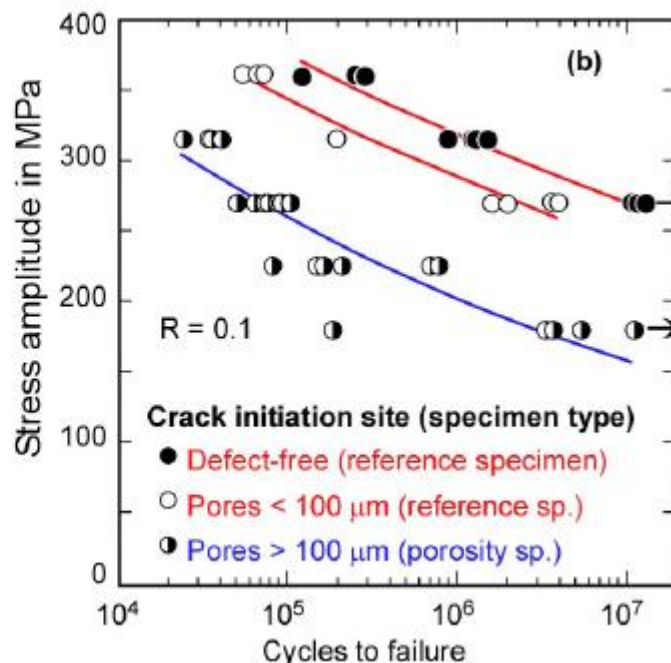
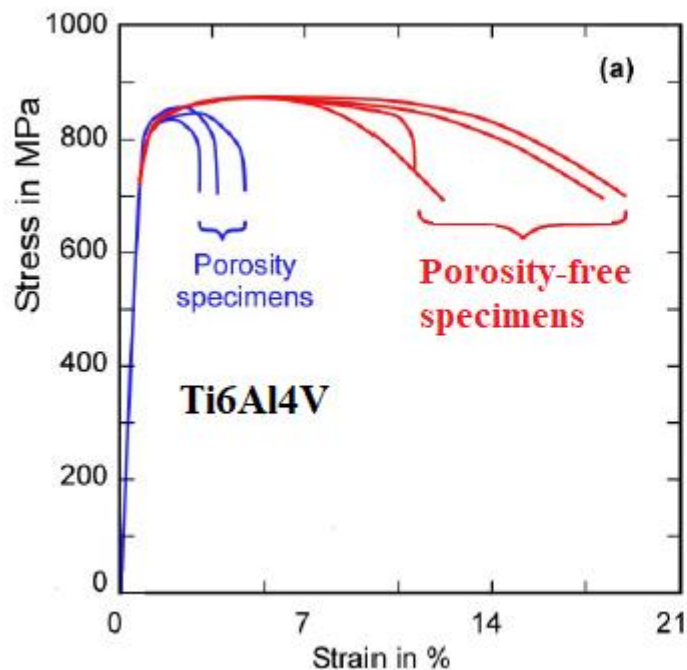
Аддитивные технологии с применением металлических и композиционных материалов для успешного внедрения требуют активного развития нормативной базы.

Зарубежная нормативная база:

- **NASA-STD-6030 «ADDITIVE MANUFACTURING REQUIREMENTS FOR SPACEFLIGHT SYSTEMS» (2021);**
- **AC 33.15-3 «Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Process for Aircraft Engine Parts» (2023);**
- **EASA «Certification Memorandum Additive Manufacturing» (2024);**
- **F3572-22 «Standard Practice for Additive Manufacturing – General Principles – Part Classifications for Additive Manufactured Parts Used in Aviation» (2022).**

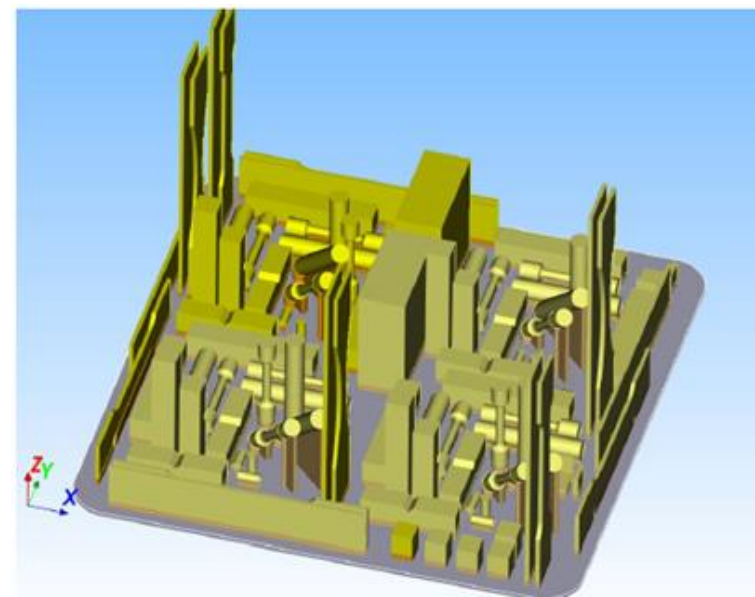
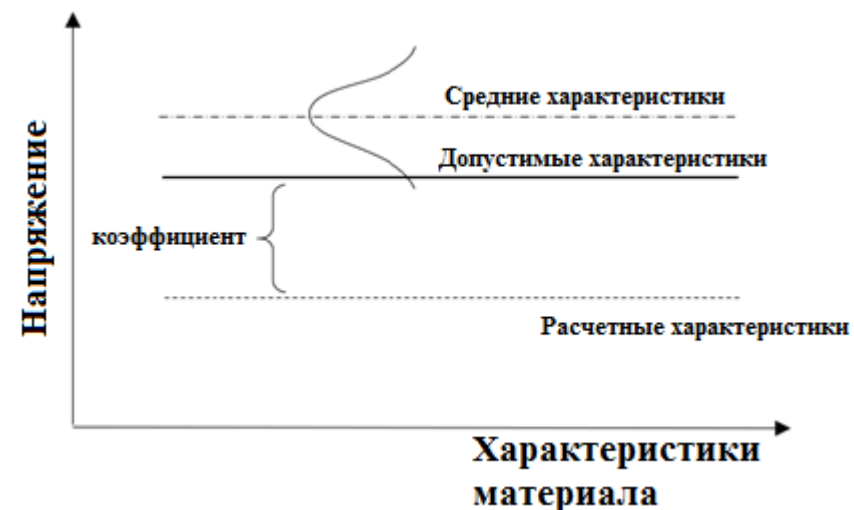


Влияние технологии на прочностные свойства



Подходы к специальной квалификации материала

STANDARD	Specimen type	Specimen orientation	Surface treatment U : Machining T: Tribofinishing	Heat Treatment T6* : Quench SR : Stress relief	Number of specimens	Number of specimens / test
Tensile test ISO 6892	Plate - TP7 shear modulus, Poisson's ratio, tensile strength	ZX	U/T	T6 / SR	6 / parameter	72
		XZ	U/T	T6 / SR		
		YZ	U/T	T6 / SR		
	Tor 4 (round, Ø4) shear modulus, Poisson's ratio, tensile strength	Z	U/T	T6 / SR	6 / parameter	96
		45°XYZ	U/T	T6 / SR		
		Y	U/T	T6 / SR		
		X	U/T	T6 / SR		
Axial Fatigue ASTM E466	Plate - FPE Kt=1,036 120MPa	ZX	U/T	T6 / SR	3 / parameter	36
	Plate - FPE Kt=1,036 100MPa	ZX	U/T	T6 / SR		
	Plate - FPE Kt=1,036 80MPa	ZX	U/T	T6 / SR		
Fracture Toughness K1C ISO 12737	2MATECH specimen	ZX	U	T6 / SR	6 / parameter	12
Chemical composition ISO 209	10mm ³ cubes	-	T	-	6	6
Thermal conductivity ASTM E1461	10x10x2.0 mm specimen	XY / ZX / ZY	U	T6 / SR	6 / parameter	36
Density ISO 3369	10mm ³ cubes	-	T	T6 / SR	6 / parameter	12
Thermal Dilatation ASTM E228	Cylinder Ø4,h=10mm	X/Y/Z	U	T6 / SR	6/ parameter	36
Charpy-V Test ISO 12737	Charpy-V specimen	X/Y/Z	U/T	T6 / SR	6/ parameter	72
						378



Специальная квалификация аддитивных материалов

1. Выбор производственного участка с технологией производства (SLM, SLS, DED, EBF₃ и т.д.). Фактически производственный участок (принтер или группа однотипных принтеров) рассматривается как литейное производство;
2. Отрабатывается производственный процесс, включая исследование производственных дефектов, выбор/разработка методов неразрушающего контроля, исследование параметров производства на характеристики материала; Разрабатывается система контроля технологического процесса.
3. Проводится исследование механических характеристик и разрабатываются методы их прогнозирования. **Проводятся испытания на усталость для оценки стабильности технологического процесса.**
4. Специальная квалификация материала;
5. Испытания готового изделия с целью становления соответствия материал-изделие в части характеристик прочности и долговечности;
6. Отработка методов контроля качества готовой детали.

25.605. Технология производства

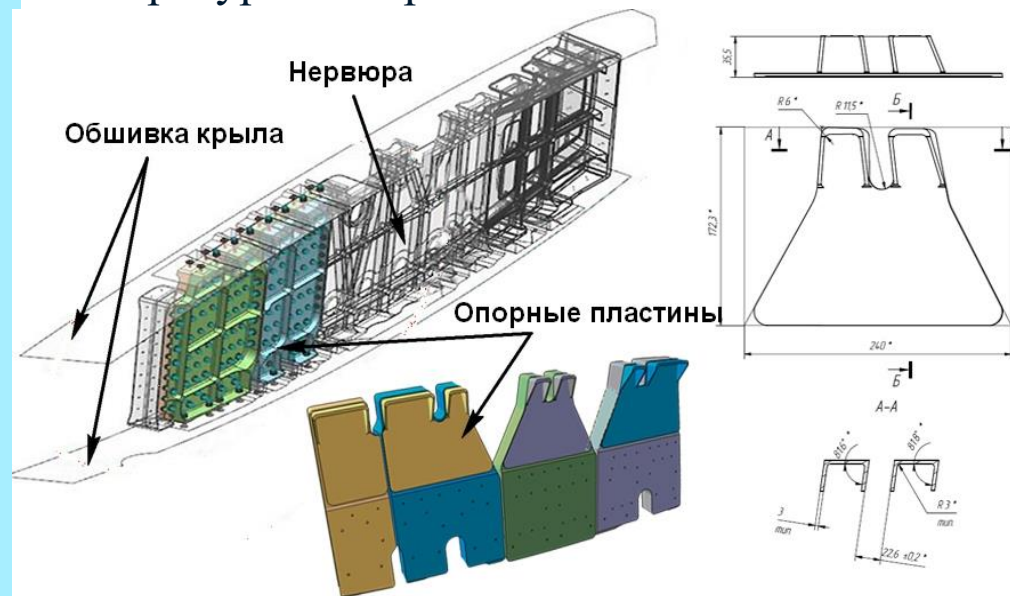
(а) Применяемая технология производства должна обеспечивать постоянство необходимого качества изготовления конструкции. Если производственные процессы (такие, как склеивание, точечная сварка, термообработка) требуют строгого контроля для достижения цели, то эти процессы должны выполняться в соответствии с утвержденными технологическими условиями.

(б) Каждый новый технологический процесс изготовления самолета должен быть обоснован исследованиями, определяемыми специальной программой испытаний.

Необходимо начинать формировать
МОС к п.25.605 и п.25.613 в части
аддитивных технологий

Опыт исследования и применения аддитивных технологий в ЦАГИ

Оперативный ремонт стенда натурных ресурсных прочностных испытаний



Обеспечен минимальный простой стенда.
Изготовленные накладки отработали в
составе стенда 1,5 года. Испытания
продолжаются



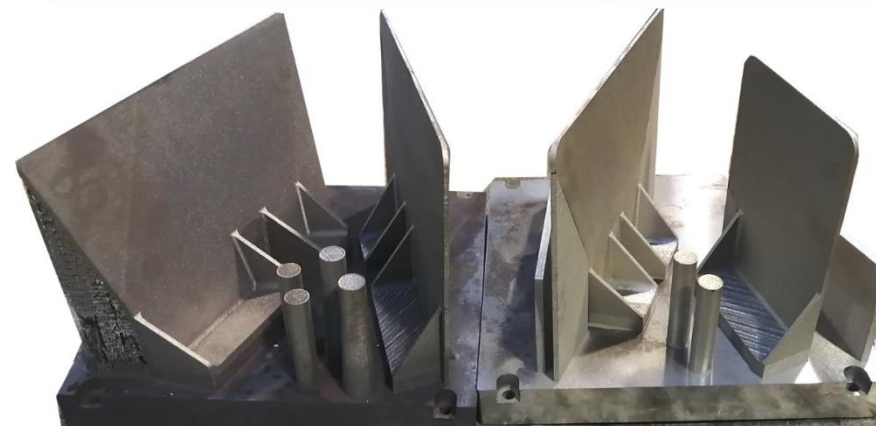
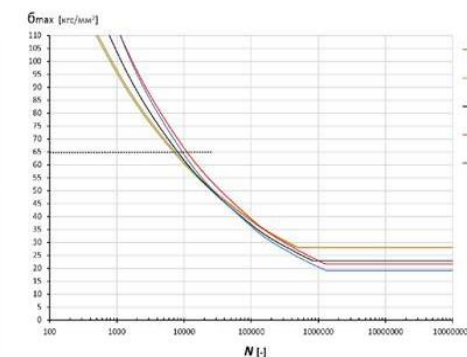
Статическая прочность

Размеры сечения образа топшва, ширина диаметр	Площадь поперечного сече- ния, F_0	Предел текуче- сти, σ_0	Прочность		Относи- тельное удлинение после раз- рыва, δ_5	Размеры шейки		Сужение по- перечного сече- ния, $\psi = \frac{F_1 - F_0}{F_0}$
			R_{m0}	σ_0		диаметр, d_1	площадь, F_1	
мм	мм ²	МПа	кН	МПа	%	мм	мм ²	%
4.999	-	19.63	1082.70	23.20	1182.04	12.88	3.26 8.35	57.47



Динамическая прочность

Образец 3 (HRC 38)	Образец 4 (HRC 36)	Образец 5 (HRC 37)
$P_{max} = 9353$ кгс $P_{min} = 935$ кгс $F = 1$ Гц	$P_{max} = 9255$ кгс $P_{min} = 925$ кгс $F = 1$ Гц	$P_{max} = 9353$ кгс $P_{min} = 935$ кгс $F = 1$ Гц
$N = 9042$	$N = 9539$	$N = 11145$



Опыт исследования и применения аддитивных технологий в ЦАГИ

Исследование свойств нержавеющей стали X15H5Д4Б:

Испытания для получения механических свойств:

Маркировка образца	F_{ϕ}	P_{max}	σ_{ϵ}	$\sigma_{0.2}$	E	ϵ_{max}
	мм ²	кН	МПа		ГПа	
1г	33,674	41,08	1219,91	1066,42	193,08	7,61
2г	33,644	41,2	1224,51	1079,74	196,48	7,72
4	32,44	39,32	1212,6	1077,46	194,56	7,59
5	32,595	39,55	1230,55	1066,34	196,43	7,96

Испытания для получения характеристик усталости (полоса с отверстием):

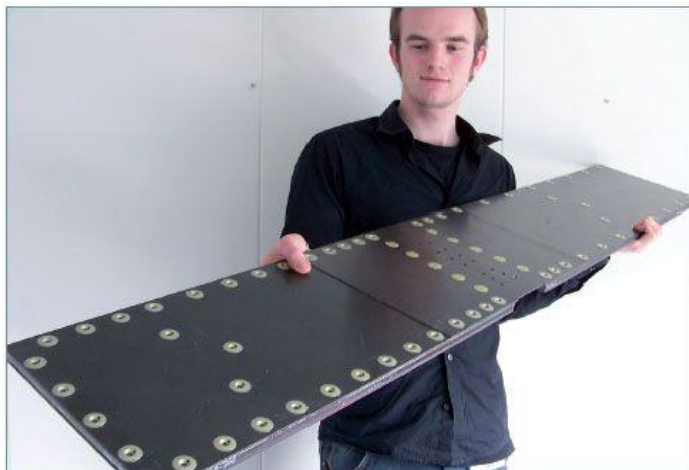
КУ $R=0; f=0.17$	Лист ВНС-2		Поковка ВНС-2Ш		30ХГСА листы 5-12 мм		X15H5Д4Б	
σ_0 , кгс/мм ²	N , цикл	σ_0/σ_b	N , цикл	σ_0/σ_b	N , цикл	σ_0/σ_b	N , цикл	σ_0/σ_b
100	3 500	0,84	3 631	0,81	3 020	0,76	106 065	0,32
50	40 000	0,42	65 357	0,41	88 926	0,38		
45	57 927	0,38	101 415	0,37	148 704	0,34		
40	87 631	0,34	165 733	0,32	264 209	0,31		
35	140 112	0,30	289 225	0,28	506 930	0,27		
30	240 859	0,25	550 053	0,24	1 075 594	0,23		
25	457 143	0,21	1 176 495	0,20	2 618 501	0,19		

Опыт исследования и применения аддитивных технологий в ЦАГИ

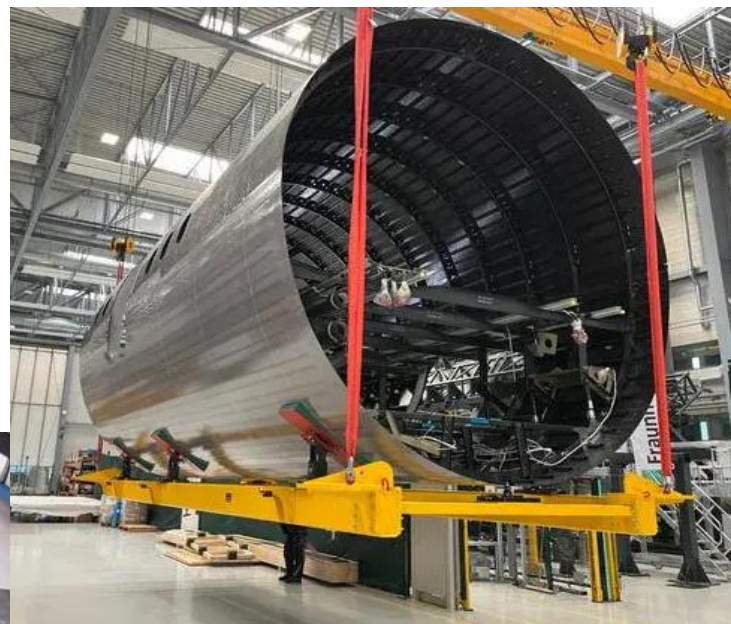
Исследование усталостных свойств материала AlSi10Mg:

Материал	№ образца	Толщина t , мм	Ширина B , мм	Площадь $F_{\text{нетто}}$, мм ²	Нагрузка P_{max} , кгс	Напряжение $\sigma_{\text{max, нетто}}$, кгс/мм ²	N, цикл
EOS AlSi10Mg	1	2,69	29,93	67,1	1073,0	16,0	32 233
	2	2,60	29,97	64,9	1038,8	16,0	53 606
	3	2,63	29,89	65,8	988,0	16,0	58 434
$\bar{N} = 10^{\lg \bar{N}} = 46565; S_{\lg N} = 0,14$							
1163ATB	008119	3,79	36,0	113,7	1592,0	16,0	135 917
	008121	3,79	36,0	113,7	1592,0	16,0	103 282
	008123	3,79	36,0	113,7	1592,0	16,0	104 764
$\bar{N} = 10^{\lg \bar{N}} = 113720; S_{\lg N} = 0,067$							

При изучении усталостных изломов было отмечено, что очаги усталостного разрушения образцов из сплава EOS AlSi10Mg располагаются под поверхностью на малом расстоянии от поверхности образцов и практически во всех случаях в зоне очага находится способствующий его образованию металлургический дефект в виде поры или раковины размером свыше 50 мкм. Данный факт существенно повлиял на величины полученных долговечностей и повышенное рассеяние усталостных характеристик.



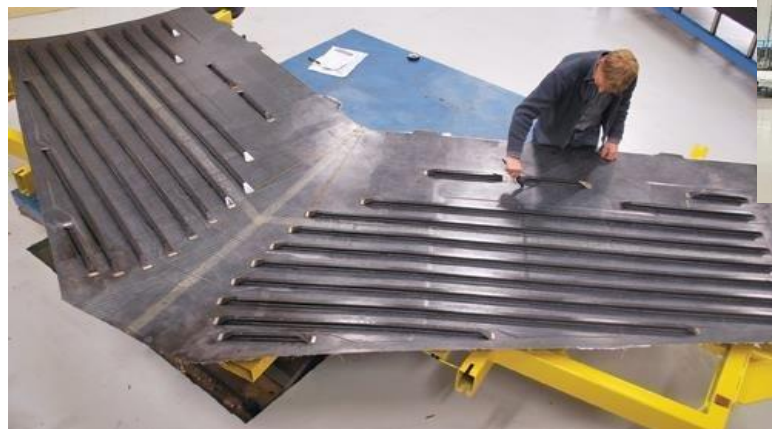
Шпангоут пола из PPS (Fokker)



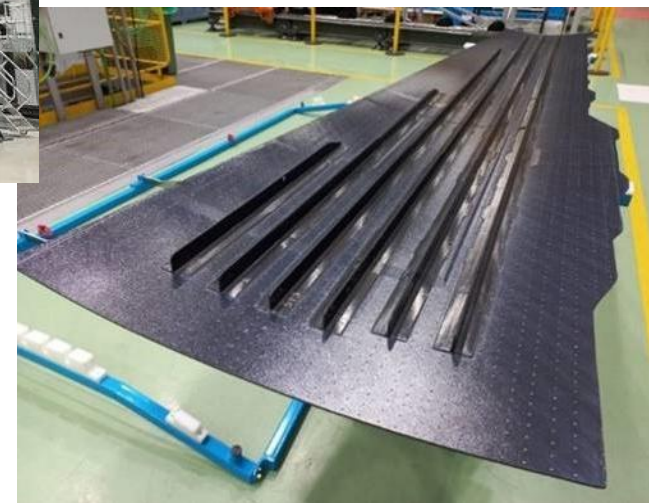
Отсек опытного
фюзеляжа разработки
Airbus



Элемент крепления фюзеляжа
из CF/PPS для A350 XWB



Пример применения
PEEK в оперении
(GKN Fokker)



Обшивка крыла, подкрепленная стрингерами
без использования крепёжных элементов из PEEK

Принципиальная схема участия кооперации при внедрении новых технологий в ЛА



Заключение

- Аддитивные технологии имеют потенциал для внедрения в силовую конструкцию воздушных судов, однако необходимо активизировать исследования направленные на развитие и изучение технологических процессов;
- Представлены основные особенности и сложности при специальной квалификации металлических материалов полученных по аддитивным технологиям;
- Необходимо формировать МОС к п. 605 и 613 (НЛГ-25;23) в части аддитивных технологий с привлечением промышленности и ведущих КБ отрасли.
- Требуется развивать аддитивные технологии для композиционных материалов, поскольку они позволяют производить крупногабаритные элементы конструкции воздушных судов.
- **ФАУ «ЦАГИ» имеет опыт применения и исследования аддитивных материалов и готово к сотрудничеству в данном направлении**

FINAL REPORT-STUDY OF
THE APPLICATION OF ADVANCED TECHNOLOGIES
TO LONG RANGE TRANSPORT AIRCRAFT

Volume II — Advanced Technology Program Recommendations
MAY 1972

(NASA-CR-112093) STUDY OF THE APPLICATION
OF ADVANCED TECHNOLOGIES TO LONG RANGE
TRANSPORT AIRCRAFT. VOLUME 2: ADVANCED
TECHNOLOGY PROGRAM (Boeing Co., Seattle,
Wash.) May 1972 245 p N72-26007
Unclas 31365
CSCL 01B G3/02

Reproduced by
NATIONAL TECHNICAL
INFORMATION SERVICE
U.S. Department of Commerce
Springfield VA 22151

Prepared under Contract No. NAS1 10703 by
THE BOEING COMPANY
Seattle, Washington 98124

for
NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

„Невозможное сегодня станет возможным завтра.“ —
Константин Эдуардович Циолковский



Свиридов Андрей Александрович
+7925-111-35-54
andrey.sviridov@tsagi.ru