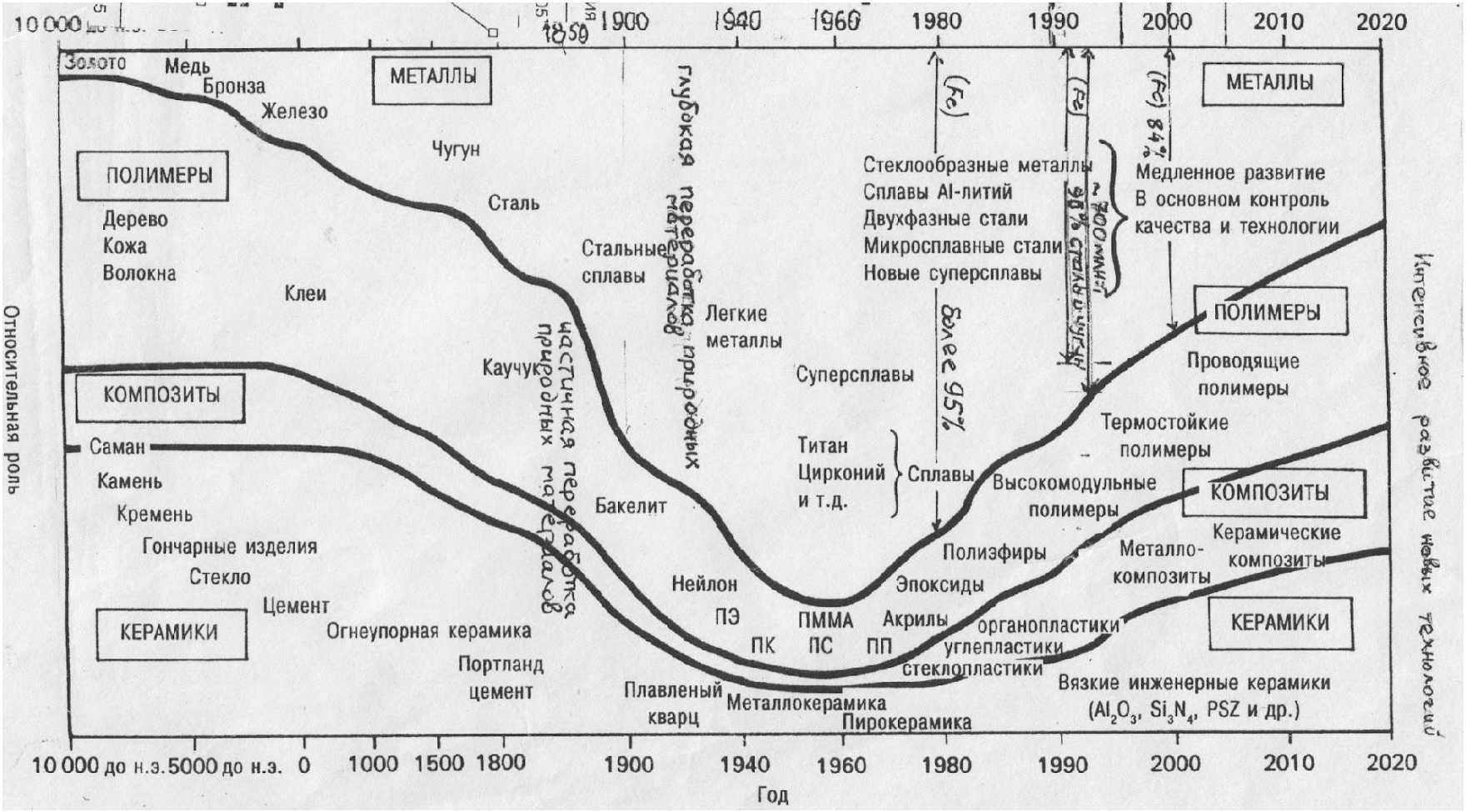
Bauman Moscow State Technical University
Department of «Rocket-space composite structures» (SM-13)

«Современные тенденции использования Powder Injection Molding (PIM) для производства ответственных фасонных изделий из металлических и керамических порошков»

Author: **Boris I. Semenov**, Doctor of science, professor

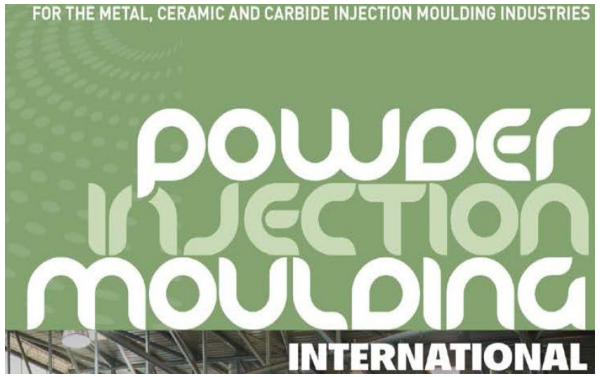
Moscow, 2018

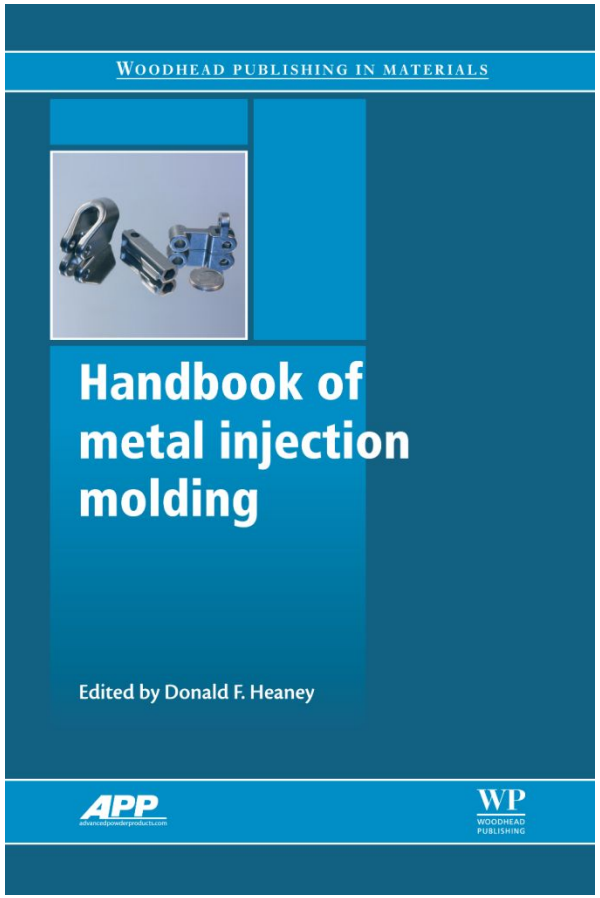
Относительная роль основных конструкционных материалов

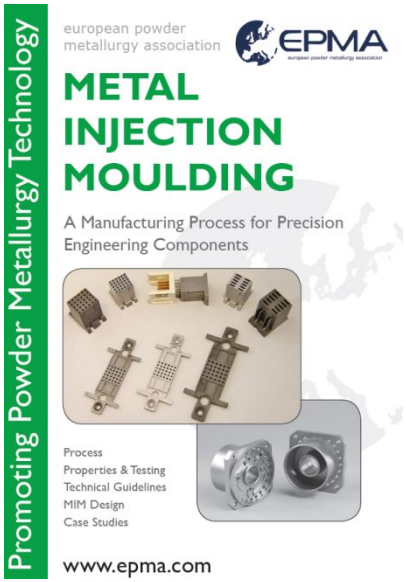


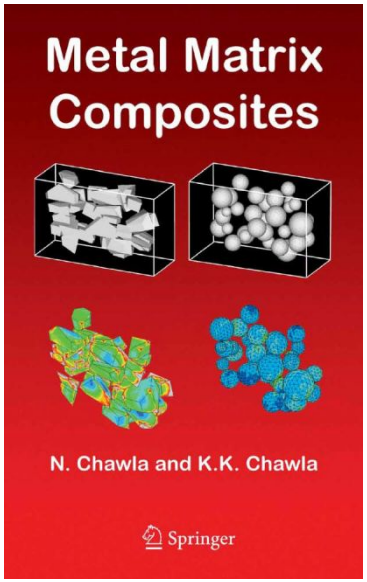
M.Ashby, «Materials Selection in Mechanical Design»
N.Chawla, K.K. Chawla «Metal Matrix Composites», 2006, Springer
«Handbook of metal injection molding», edited by D.F. Heaney, 2012, Woodhead Publ.

Рекомендуемая литература





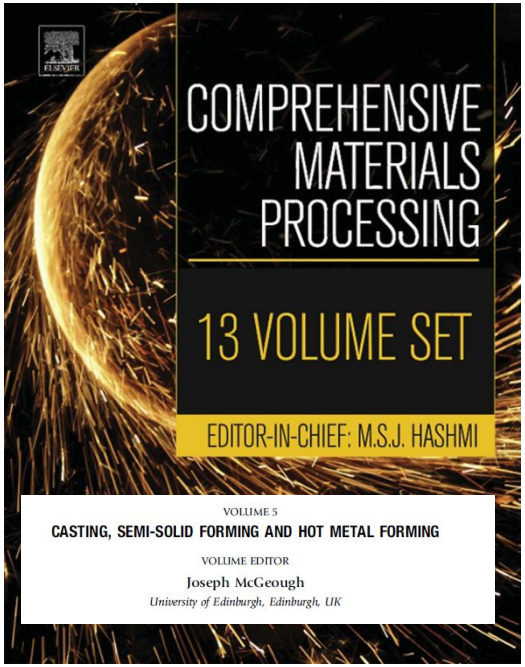


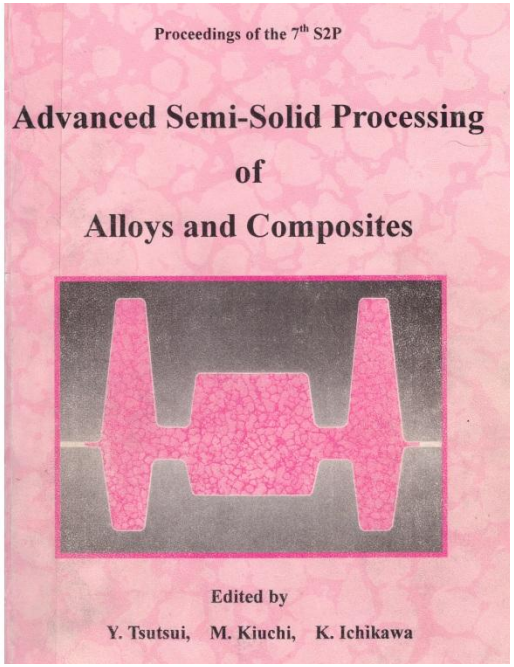


Preface

1. Introduction
2. Reinforcements
3. Matrix Materials
4. Processing
5. Interface
6. Micromechanics
7. Monotonic Behavior
8. Cyclic Fatigue
9. Creep
10. Wear
11. Applications

Author Index
Subject Index





Выбор инженерного решения, база данных

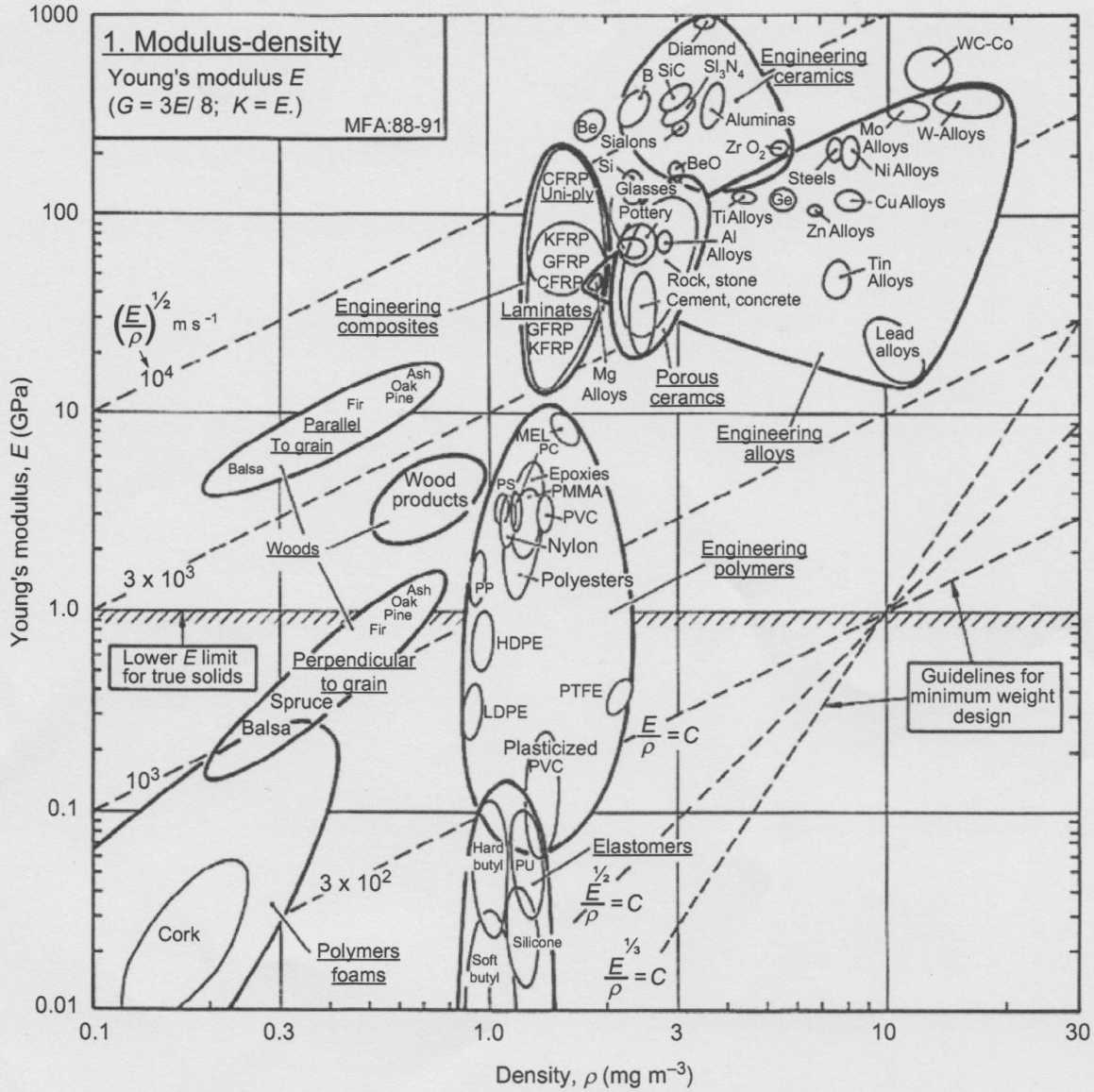
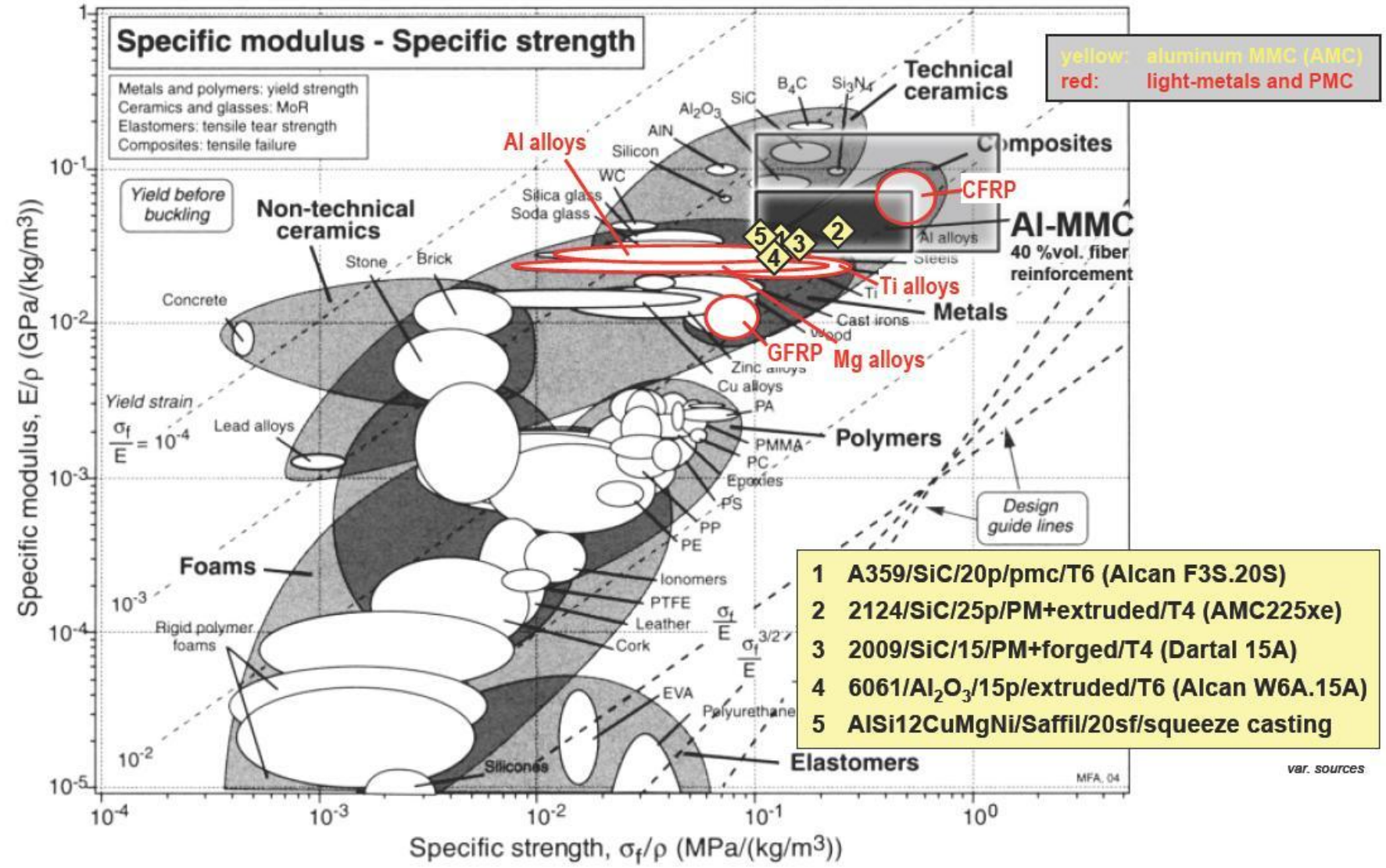


Figure 3 Comparison of the Young's (tensile) modulus and density of different classes of materials, including plastics, elastomers, and FRPs. After Ashby, M. *Materials Selection in Mechanical Design*; Pergamon: Oxford, 1992.

Выбор инженерного решения, база знаний, карты выбора

Specific Properties – Material Comparison for Design Engineers

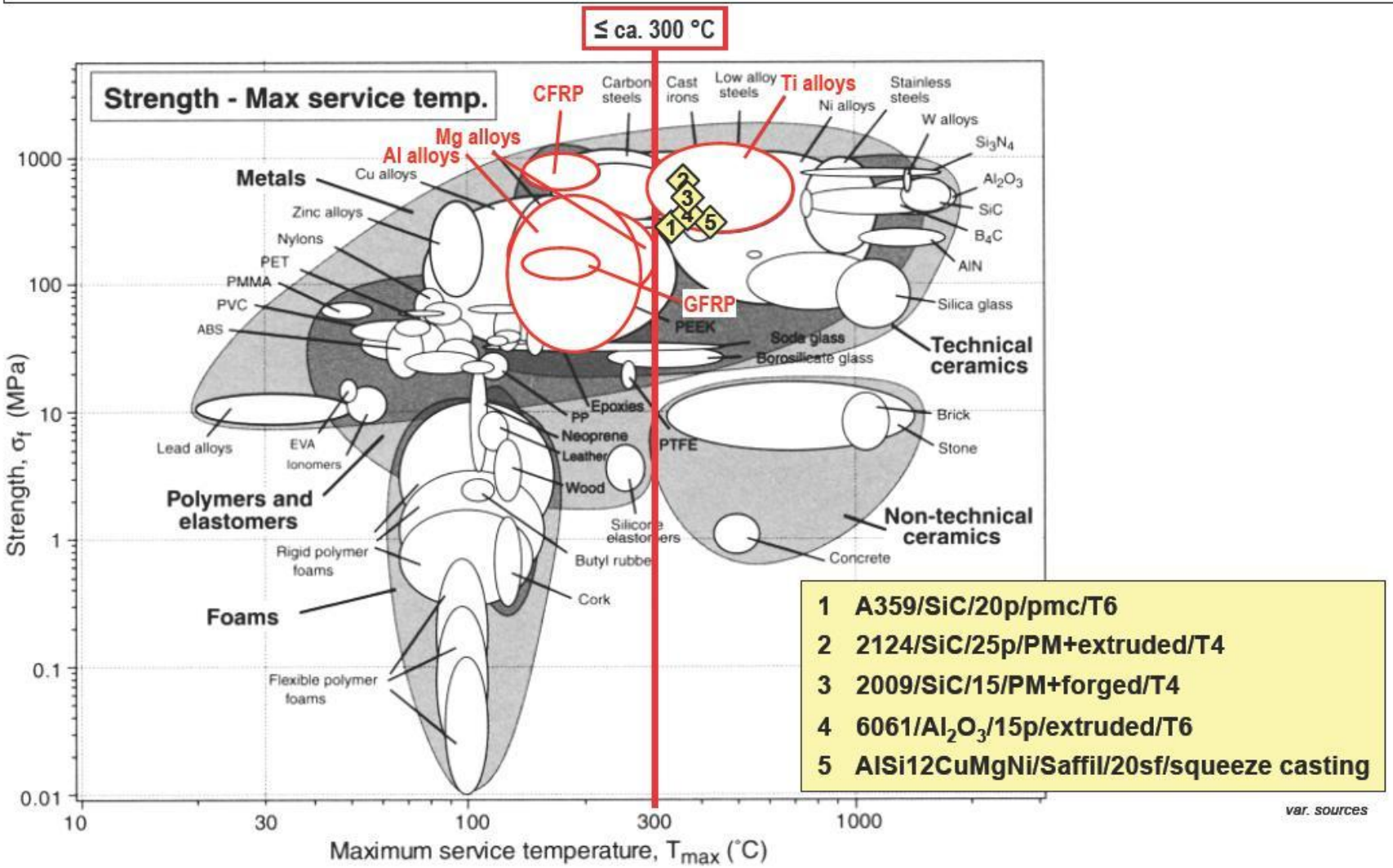


1 A359/SiC/20p/pmc/T6 (Alcan F3S.20S)
2 2124/SiC/25p/PM+extruded/T4 (AMC225xe)
3 2009/SiC/15/PM+forged/T4 (Dartal 15A)
4 6061/Al_2O_3/15p/extruded/T6 (Alcan W6A.15A)
5 AlSi12CuMgNi/Saffil/20sf/squeeze casting

according to. M.F. Ashby: Materials Selection in Mechanical Design. 3rd ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2005

Выбор инженерного решения, база знаний, карта выбора

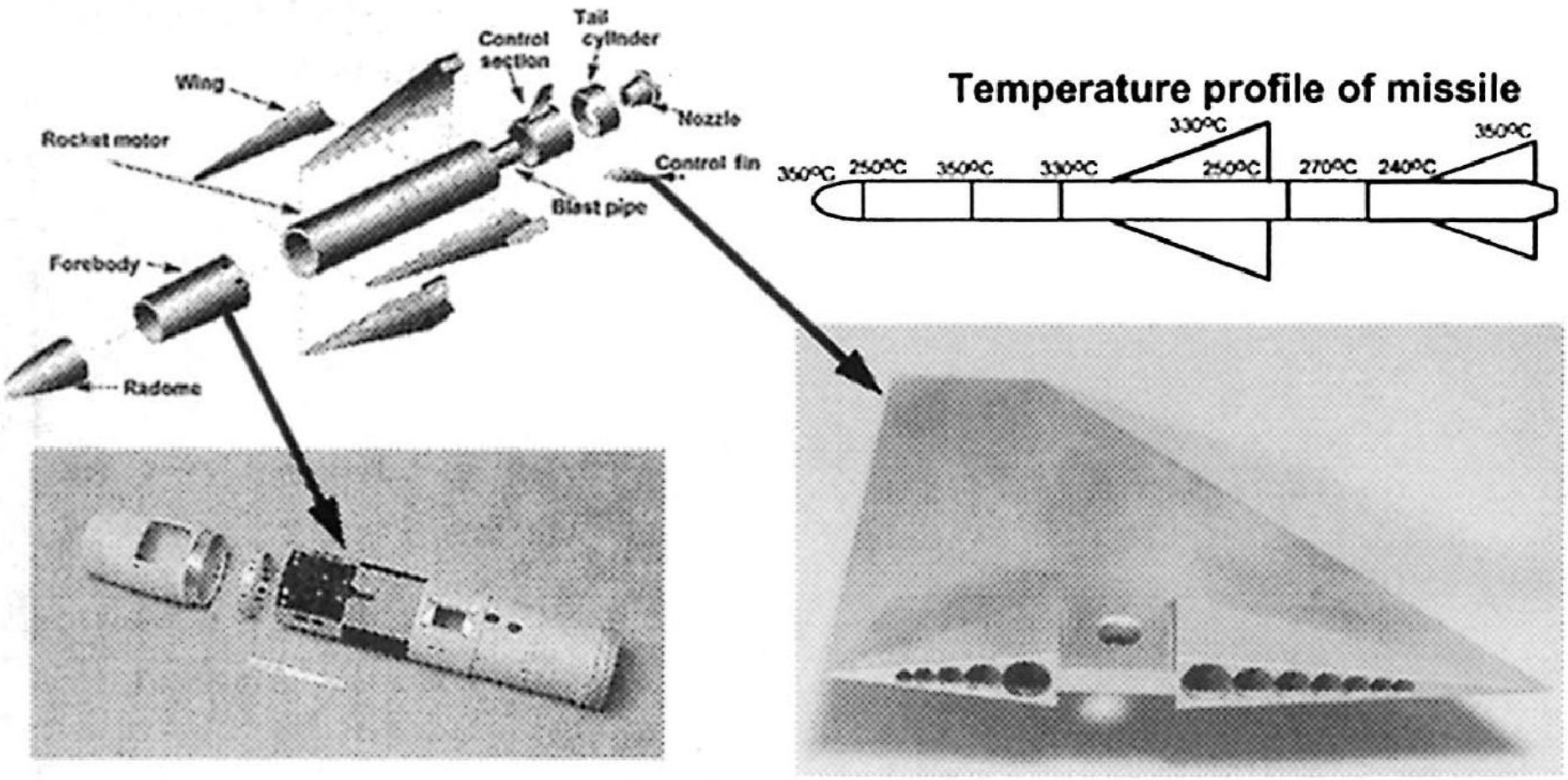
Comparison of Material's Properties



according to. M.F. Ashby: Materials Selection in Mechanical Design. 3rd ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2005

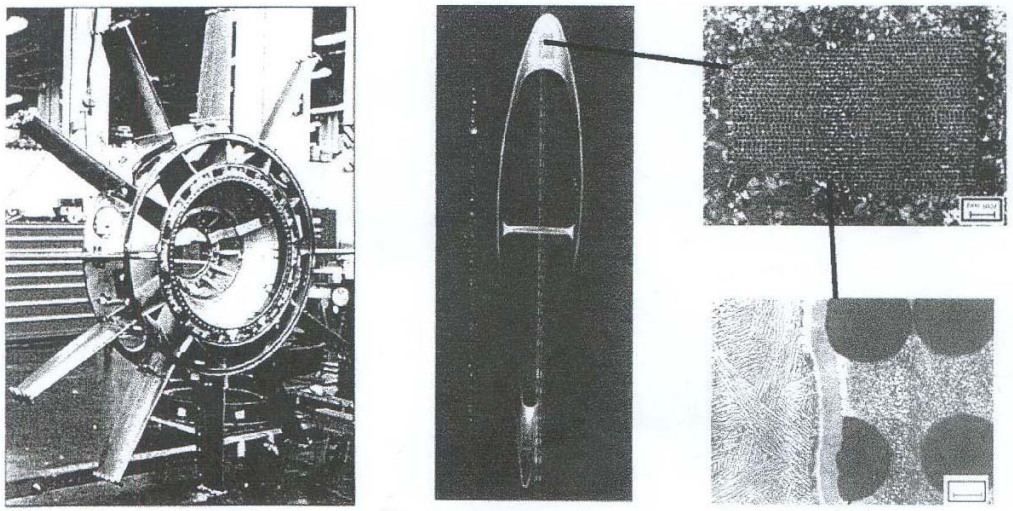
Residual tensile strength at 350 °C: *− Aluminum Matrix Composites:* *ca. 150 MPa*
− non-reinforced Al: *ca. 80 MPa*

Использование алюмоматричного композита в конструкции ракеты



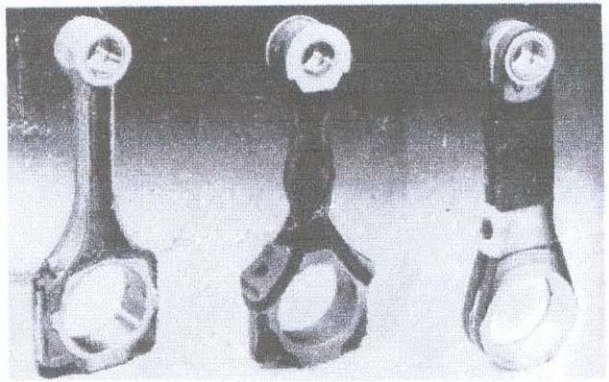
Важное приложение для ММС - это ракеты (Shakesheff and Purdue, 1998). Для ракет обычные алюминиевые сплавы не обладают требуемой прочностью и термостойкостью. Сталь и титан не приемлемы с точки зрения массы. ММС предлагают повышенную прочность и жесткость без увеличения веса. Кроме того, повышенная температура воздействует на ракету очень короткой по продолжительности отрезок времени (с момента ее запуска, до момента, когда она встречает цель). Таким образом, ММС рассматриваются в ракетных крыльях и плавниках.

Варианты конструкторско-технологических решений



а) б) в)

Конструкция двигателя, лопасти и размещение в ней композиционного материала, а) изделие; б) лопасть; в) композитная вставка и один из уровней ее защиты



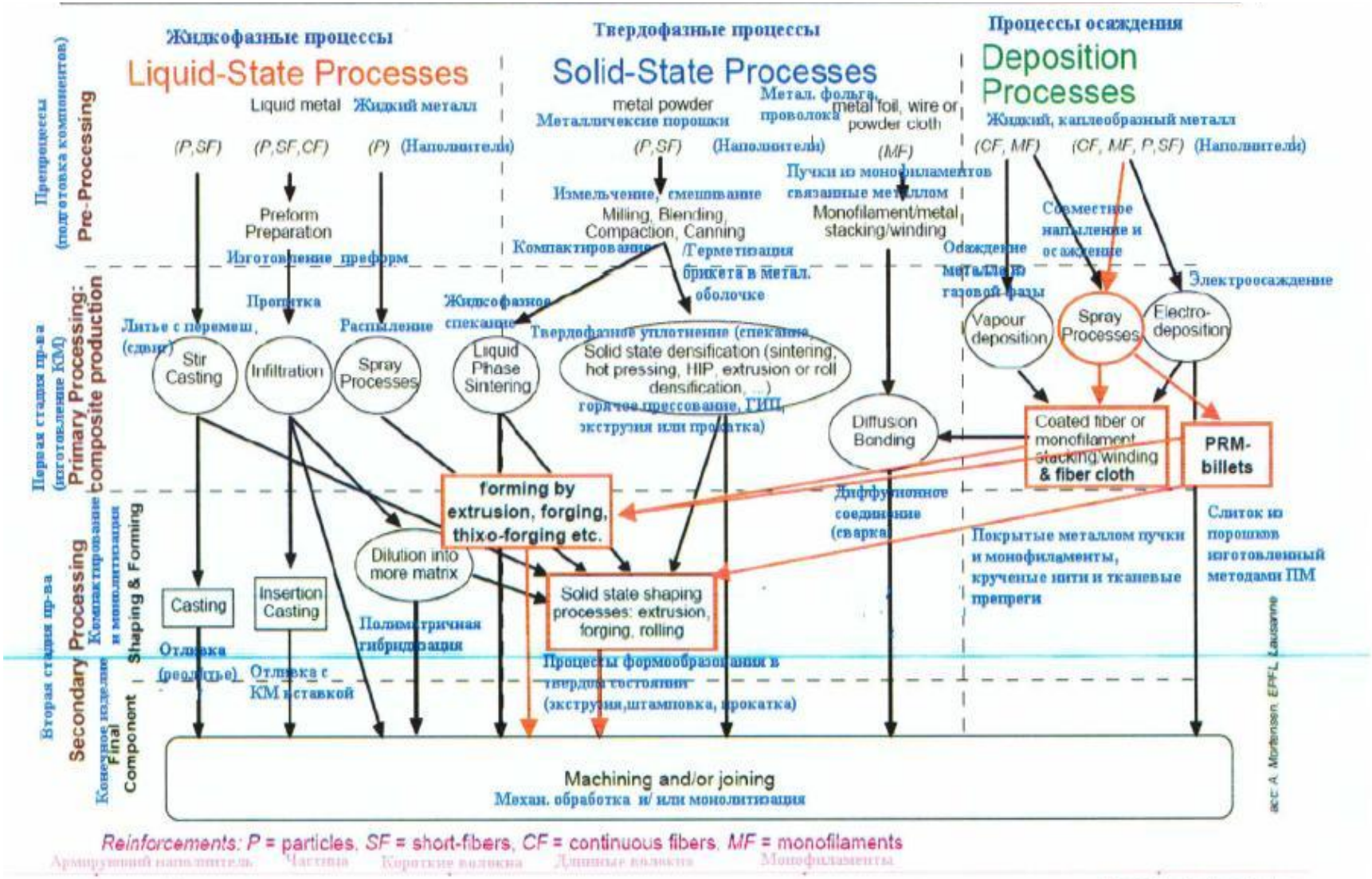
а) б) в)

Изменение конструкции и геометрии шатуна в связи с заменой материала, а) стальной шатун (деталь), б) комбинированный шатун из металла и углепластика (деталь), в) комбинированный шатун (сборочная единица).

Детали, изготовленные из МКМ, армированные частицами

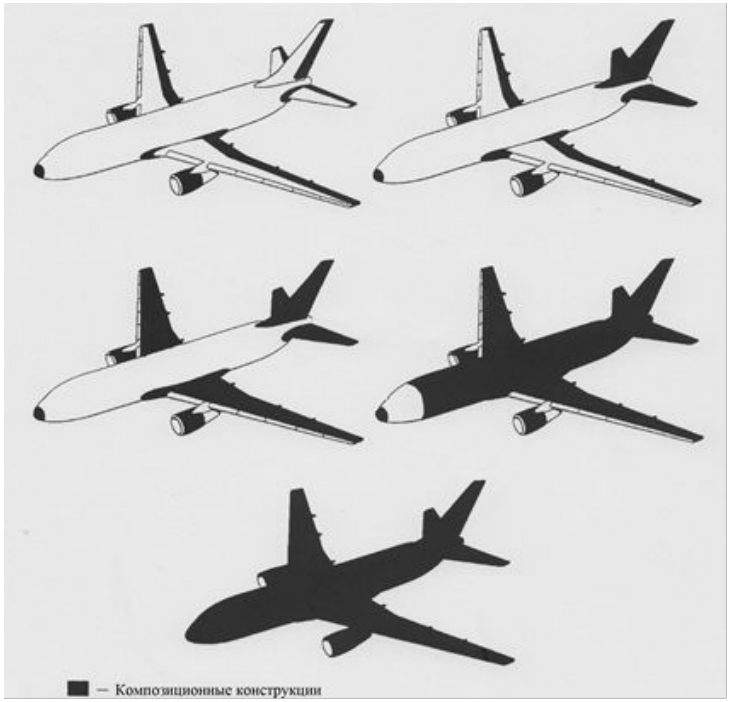
Выбор технологического решения

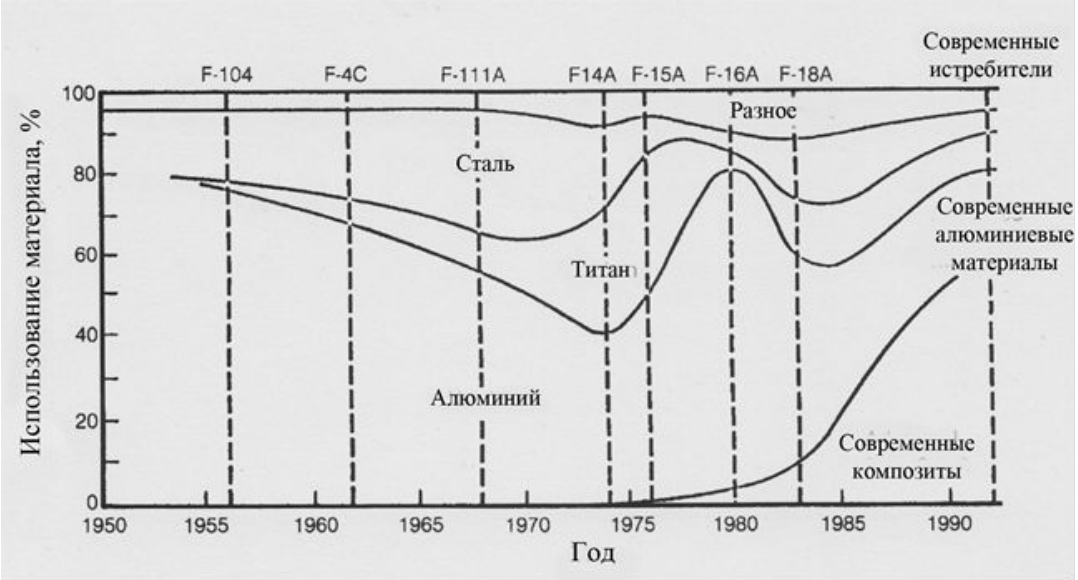
New process Development



Современные материалы и объемы их использования

Изделие	Доля композитов, %
РДТТ	75-80
ЖРД	25-30
Космические аппараты	15-25
Боевые самолеты	45-55
Боевые вертолеты	25-30
Гражданские самолеты	15-20





e Boeing 787 Dreamliner

Table 15.11 Material Types and Contents for Boeing 787 and 777 Aircraft

Aircraft	Material Content (Weight Percent)				
	Composites	Al Alloys	Ti Alloys	Steel	Other
787	50	20	15	10	5
777	11	70	7	11	1

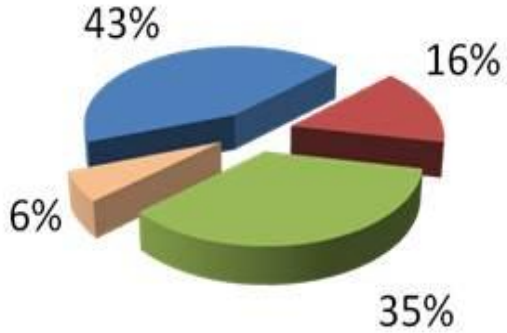
Материалы в конструкции планера легких истребителей

Динамика изменений в весовом соотношении материалов в конструкции планера:

Полимерные КМ: +31%

Титановые сплавы: +14%

Боевой истребитель 4-го поколения F-16A (1978 г.)



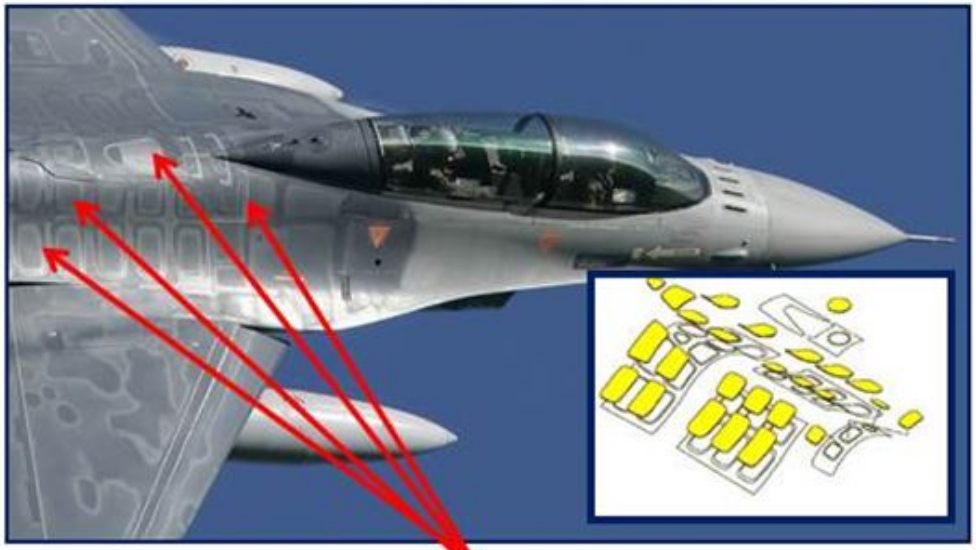
Боевой истребитель 5-го поколения F-35A (2012 г.)

Применение дискретно-армированных МКМ в планере истребителя F-16C/D

23 из 26 лючков доступа к заправочным горловинам истребителя F-16 C/D изготовлены из МКМ Al 6092/SiC/17.5р.

Достигнутые результаты:

- повышение жесткости на 40%,
- снижение массы за счет применения более тонких листов (2,03 мм- 2,54 мм, ранее до 5 мм),
- увеличение ресурса до 8 000 летных часов



Люки доступа к заправочным горловинам

Подфюзеляжные кили

Подфюзеляжные кили истребителя F-16C/D изготовлены из МКМ Al 6092/SiC/17.5р.

Достигнутые результаты:

-стойкость к механическим повреждениям

-увеличение ресурса на 400%

-снижение эксплуатационных расходов на 26 млн долл. на весь парк самолетов за счет увеличения сроков межремонтного ресурса, технического обслуживания и т.д.

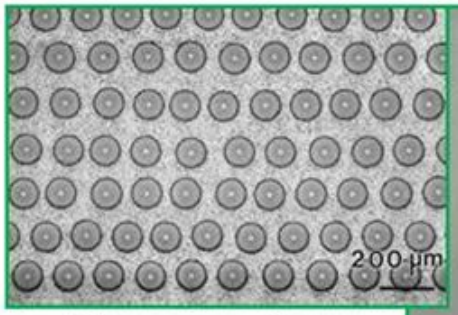
Варианты конструкторско-технологических решений

Диск компрессора типа «bling»

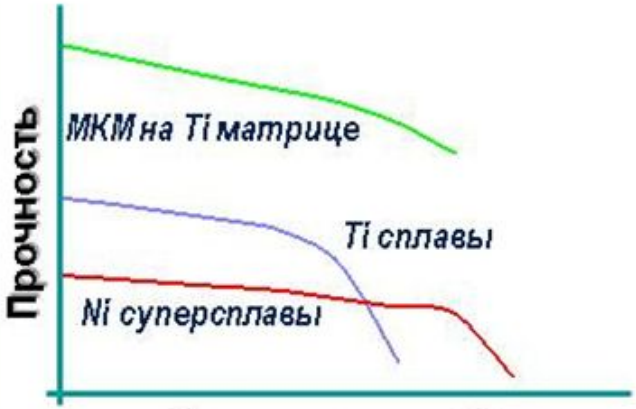
Традиционная схема

Диск компрессора типа «Блиск» – снижение веса конструкции на 30%

Диск компрессора типа «Блинг» – снижение веса конструкции свыше 70%



Диск типа «Блинг», изготовленный Rolls-Royce



Свойства МКМ на титановой матрице

Ti–6Al–4V/SiC$_{вол}$, однонаправленный, 35% волокна, при 23°C

Предел прочности при растяжении, 0°	= сталь	1690 МПа
Модуль Юнга		199,9 Гпа
Предел прочности при растяжении, 90°		400 МПа
Малоцикловая усталость, 0° (830 МПа, 3 Гц, R=0.1)		>500 000
Малоцикловая усталость, 90° (190 МПа, 3 Гц, R=0.1)		>500 000
Многоцикловая усталость, 0° (530 МПа, 30 Гц, R=0.1)		$>10^7$
Многоцикловая усталость, 90° (89.6 МПа, 30 Гц, R=0.1)		$>10^7$
Прочность при сжатии	>2X сталь	4480 МПа
Плотность	½ сталь	3.93 г/см³
Коэффициент термического расширения		5.9×10^{-6}/°C

Свойства SiC-волокон, применяемых в Ti-МКМ

торговая марка	производитель	диаметр {мкм}	$\sigma_в$ {ГПа}	E {ГПа}	плотность {г/см³}	диаметр керна/тип {мкм}	покрытие/ тип {мкм}
Sigma 1140	QinetiQ	100	3.4-4.1	400-410	3.4	14 / W	3-5 / C
Sigma 1240	QinetiQ	100	3.4-4.1	400-410	3.4	14 / W	1C+1TiB_x
SCS - 6	Specialty Mat.	140	3.456	380	3.0	33 / C	3C+Si
SCS – 9A	Specialty Mat.	78	3.45	307	2.8	н / д *	н / д
SCS Ultra	Specialty Mat.	142	5.865	415	3.0	33 / C	3C+Si
Trimarc I	FMW Composite System	129	3.5	427	3.3	12.5 / W	3C
Trimarc II	FMW Composite						

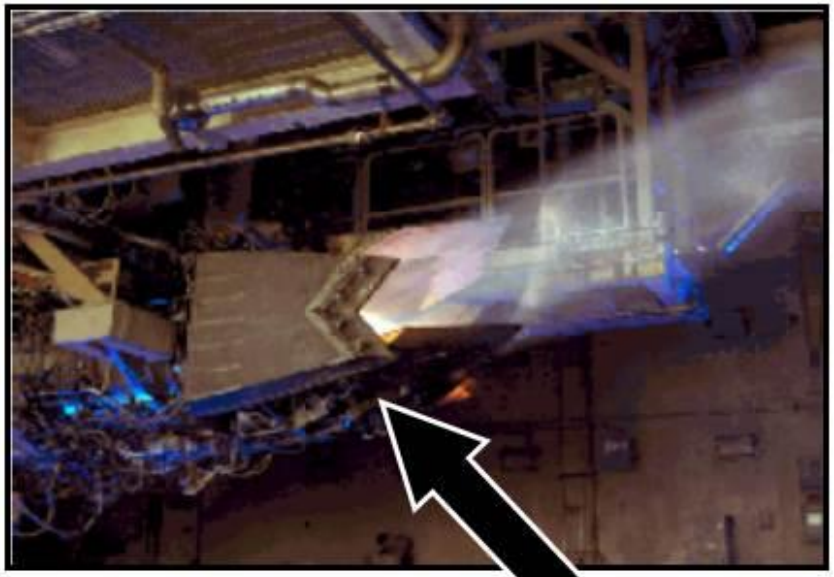
Стойки шасси самолета F-16C

Компания SP Aerospace (Нидерланды) заменяет подкосы основных стоек шасси истребителя F-16C , изготовленные из стали, на подкосы из Ti-МКМ

- экономия веса до 40%
- повышенная коррозионная стойкость
- увеличение усталостной прочности

Волокно : SCS-6 (Textron Specialty Materials)
Матрица : сплав Ti – 6Al – 4Sn – 2Zr – 4Mo
Технология : обжатие лент, полученных путем осаждения матрицы плазменным напылением на армирующие волокна, горячим гидростатическим прессованием с последующей механической обработкой

Поршень привода отклоняемого сопла ГТД F119-PW-100



Поршень привода сопла

производится компанией FMW Composite Systems Inc.

Поршень привода отклоняемого сопла самолета F-22A изготавливается компанией FMW Composite Systems Inc. по заказу ВВС США.

Волокно: Trimarc 1

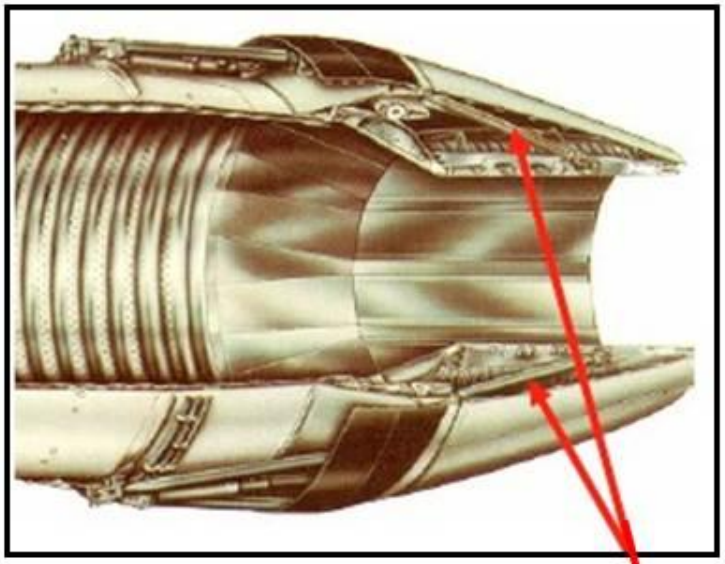
Матрица: Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo

Технология: намотка на барабан волокон Trimarc 1 и проволоки Ti-6242 с последующей консолидацией горячим изостатическим прессованием при температуре 953°С и давлении 103 МПа в течение 2 часов

Размеры: 30.5 см (длина)
3.79 см (диаметр)

Свойства: содержание волокна – 32.4 %
количество волокон – 48 / см
рабочая температура - 450°С

Тяга управления створками сопла ГТД F110-GE-129



Тяги управления створками
12 шт. на двигатель

производится компанией
FMW Composite Systems Inc.

Use of composites in the Boeing 787 Dreamliner

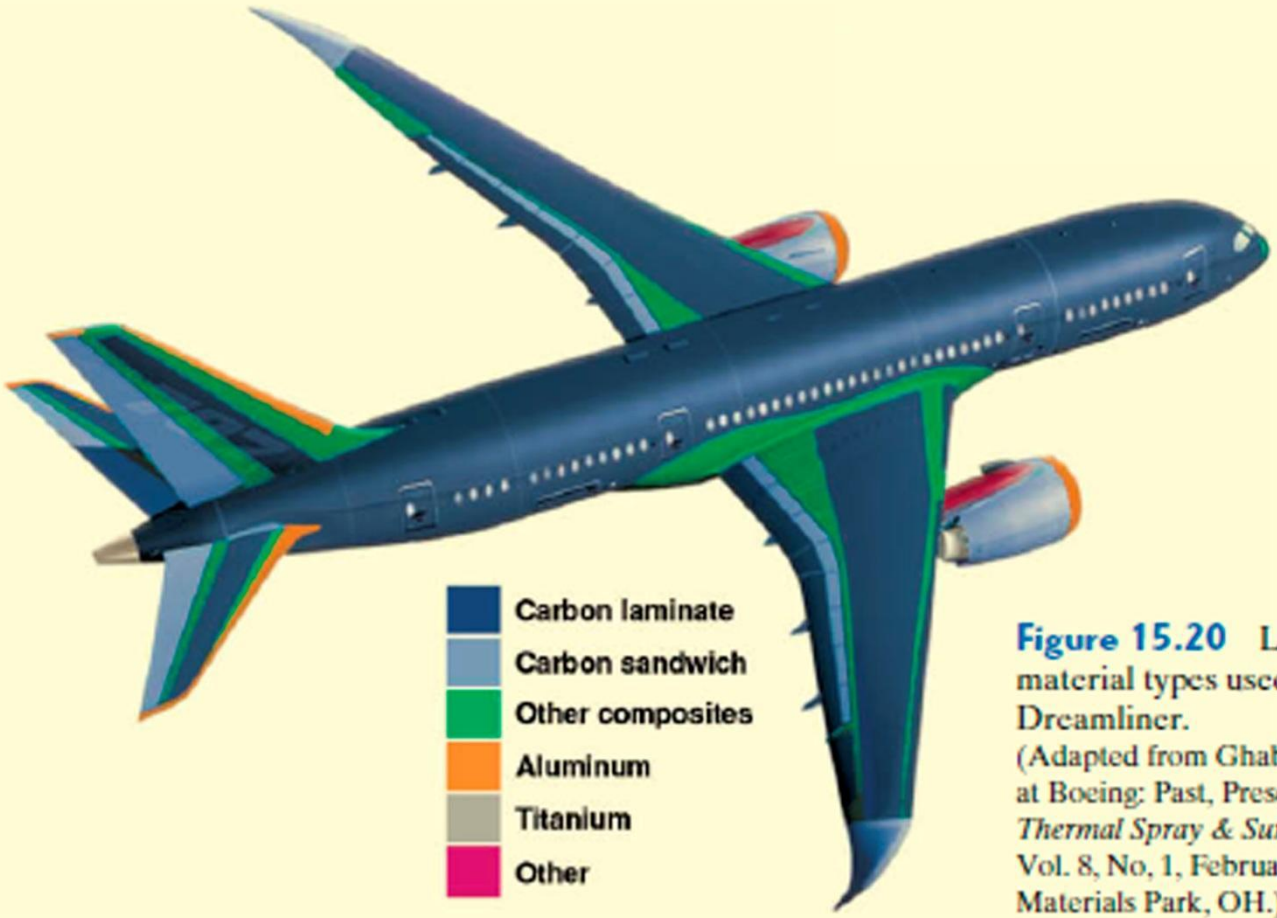


Figure 15.20 Locations of the various material types used in the Boeing 787 Dreamliner.
(Adapted from Ghabchi, Arash, "Thermal Spray at Boeing: Past, Present, and Future." *International Thermal Spray & Surface Engineering (iTSSe)*, Vol. 8, No, 1, February 2013, ASM International, Materials Park, OH.)

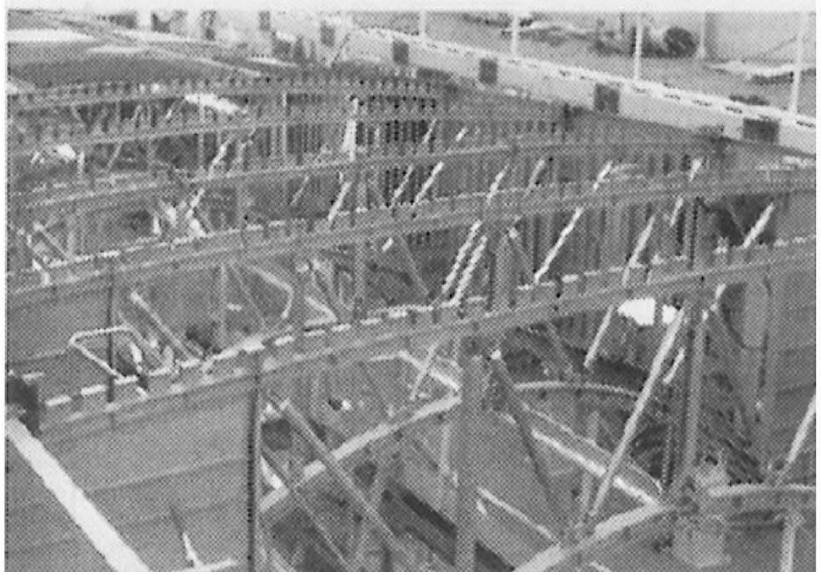
Composite materials account for 50% (by weght) of the Dreamliner and aluminum alloys 20%. By way of contrast, the Boeing 777 consist of 11% composites and 70% aluminum alloys. These composites and aluminum contents as well as contents for other materials used in the construction of both 777 and 787 aircraft (i.e., titanium alloys, steel, and other) are listed in poster №3.

Космические аппараты

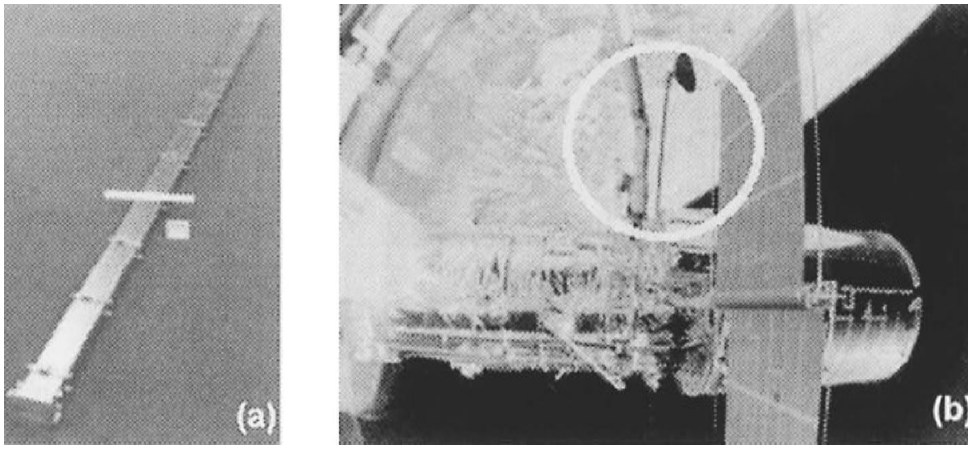
Уменьшение веса компонента является значительной движущей силой для любого применения в аэрокосмической промышленности. Первым успешным применением непрерывных армированных волокном ММС было усиленные борным волокном трубчатые стержни (распорки в каркасе) и элементы фермы ребер средней части фюзеляжа космического челнока. Стойки обеспечивали экономию веса на 45% по сравнению с неармированным алюминием. В телескопе Хаббла, композит на основе алюминиевого сплава и непрерывного углеродного волокна был использован для волноводных штангами из-за его легкого веса, высокого модуля упругости и низкого коэффициента теплового расширения. Материал изготовлен из листового материала с диффузионным соединением и имеет длину 3,6 метра. Стрела требует хорошей жесткости и низкого коэффициента расширения для поддержания положения антенны во время космических маневров. В таблице показаны свойства однонаправленных армированных волокном ММС, используемых в космических применениях.

	v_f, %	ρ, г/см^3	Коэф. Пуассона	C_p, Дж/(кг*К)	Продольные свойства				Поперечные свойства		
					E, ГПа	σ_B, МПа	λ, Вт/(м*К)	КЛТР, 10^{-6}/К	E, ГПа	σ на сжатие, МПа	λ, Вт/(м*К)
Pl00 / 6061 Al	42,2	2,5	0,3	812	343	905	320	-0,49	35	25	72
P100 / AZ91C Mg	43	2,0	0,3	795	324	710	189	0,54	21	22	32
Бор / Al	50	2,7	0,2	801	235	1100	-	5,8	138	110	-

*P100 – углеродное волокно.

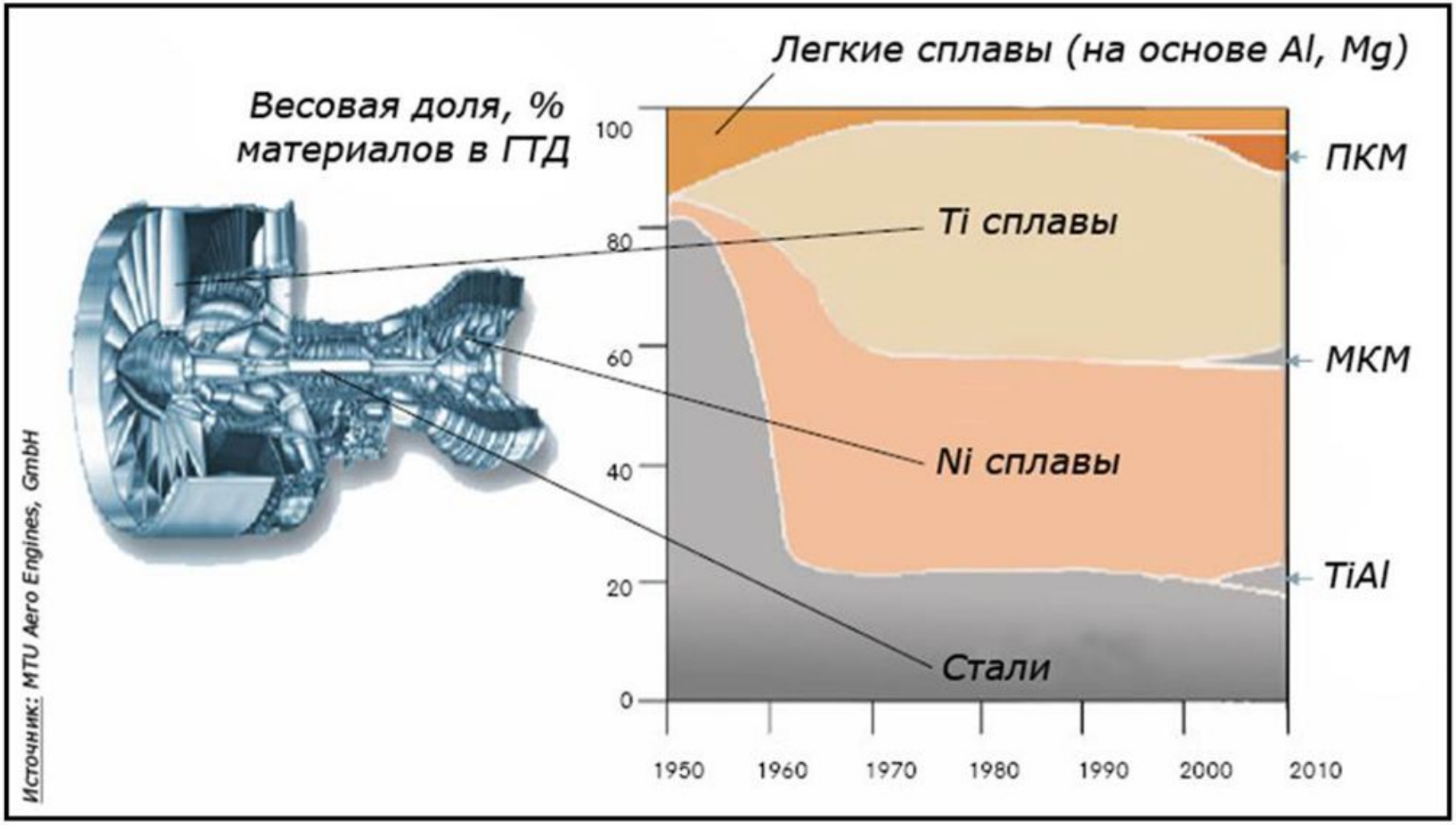


Al/B_f tubular struts in the frame and rib truss members of the mid fuselage section of the space shuttle (courtesy of S. Rawal; reprinted with permission from The Minerals, Metals, and Materials Society). The struts provide a weight savings of 45% over unreinforced aluminum.

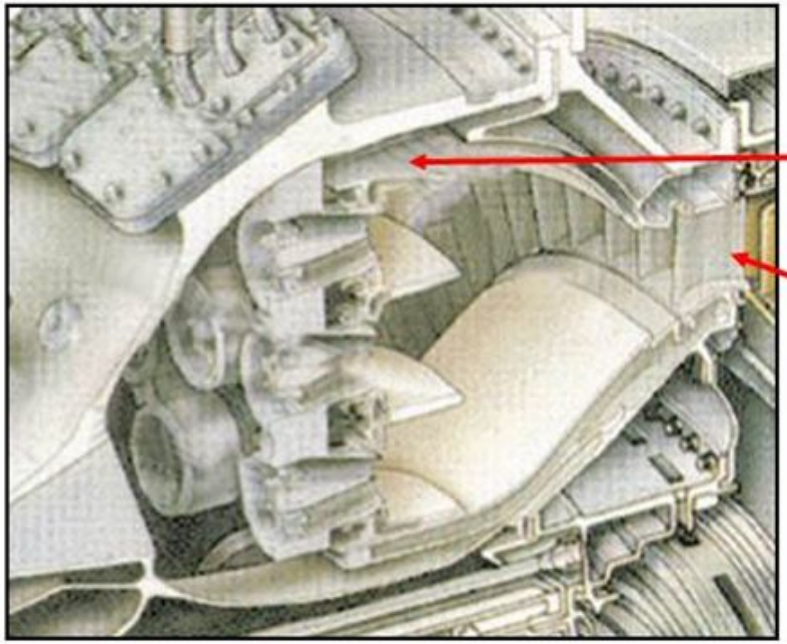


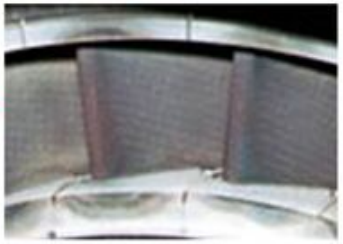
Carbon fiber reinforced 6061 Al matrix composite used as antenna waveguide/boom on the Hubble Space Telescope (courtesy of S. Rawal; reprinted with permission from The Minerals, Metals, and Materials Society): (a) before integration on the telescope and (b) deployed in space.

Тенденции применения материалов в авиационных ГТД



Кольцевая камера сгорания ГТД F136





Направляющие лопатки изготовлены из **Castcool Lamilloy®**

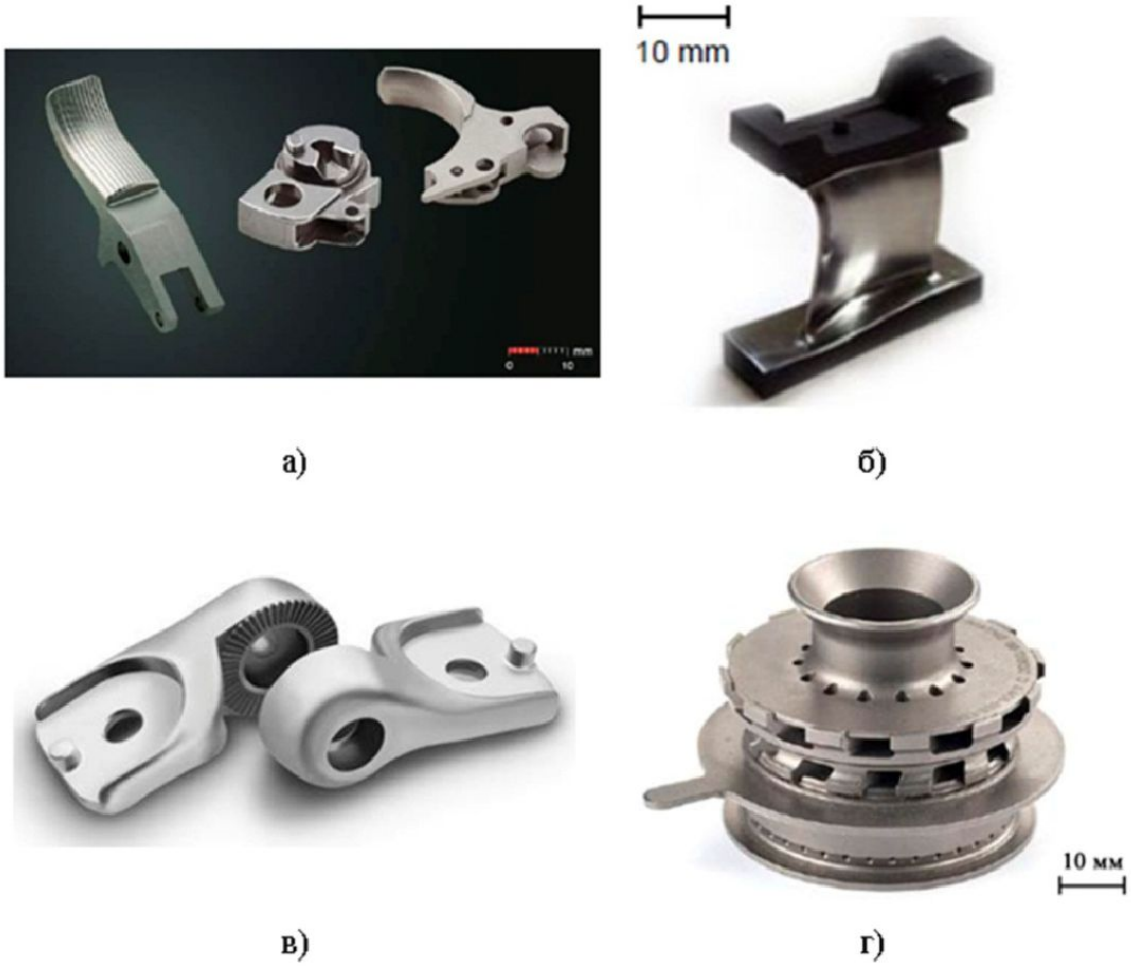
Камера сгорания изготовлена из материала Lamilloy® и керамических КМ.

Технология изготовления слоистого материала Lamilloy принадлежит компании Allison Advanced Development Company (в настоящее время входит в Rolls-Royce)

Варианты материала Lamilloy:

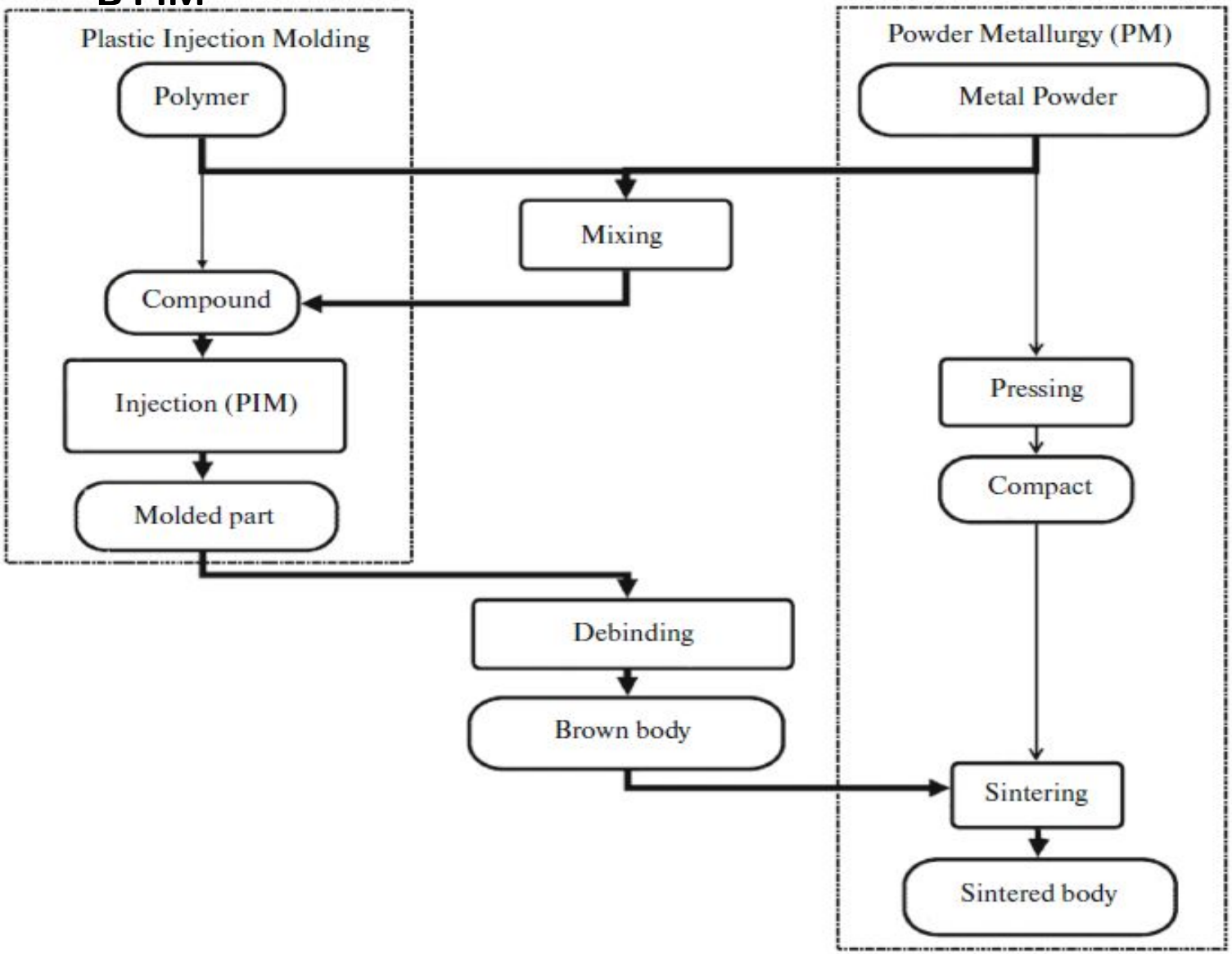
1. Изготовленный из листов сплава **Haynes 188** с теплозащитными покрытиям
2. Изготовленный из монокристаллического никелевого суперсплава **CMSX-4**;
3. Изготовленный из листов сплава MA754.

Выбор технологического маршрута
AM
(ВИАМ)
порошок
50-70 мкм
Разработка
3D-модели
детали
Разработка технологий
лазерного синтеза
(1960 слоев)
Расположение на столе,
моделирование поддержек,
генерация слоев
Обработка
безопорных
поверхностей
PIM
порошок
1-20 мкм
Удаление
связующего
каталитическим,
растворным или
термическим
способом
Мехобработка
и сборка
Изготовление фидстока,
проектирование и
изготовление оснастки
Литье
под давлением
«зеленой» детали
Спекание в вакууме,
инертной или
восстановительной атмосфере
Завихритель



Примеры деталей, изготовленных зарубежными производителями MIM – методом: а) – детали огнестрельного оружия; б) – лопатка двигателя из сплава IN718; г) – детали эндопротеза из сплава Ti6Al4V; г) – завихритель двигателя из сплава Hastelloy X

Материалы и процессы, превращающие PM в PIM



Components and technological operations that transform PM into PIM.

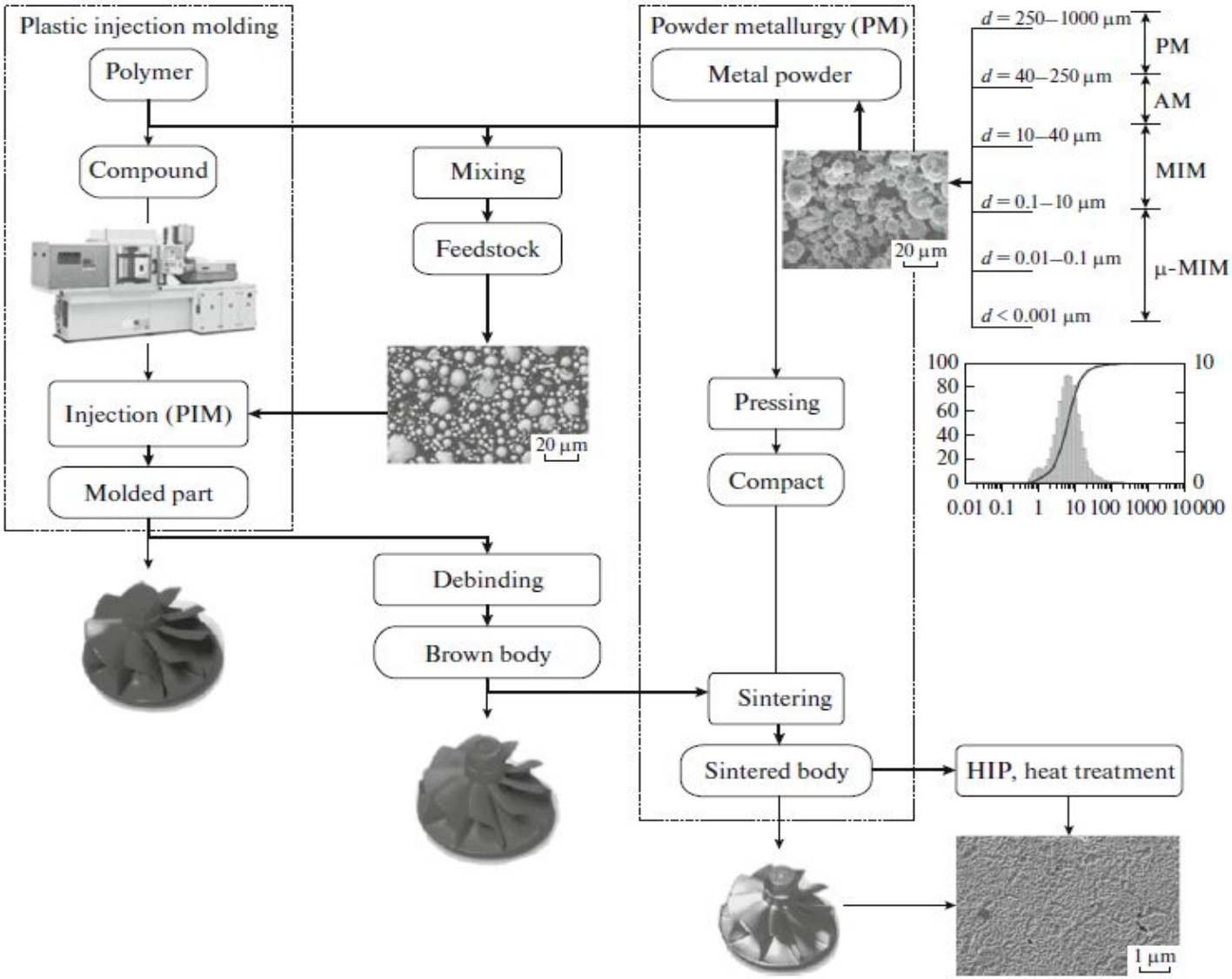
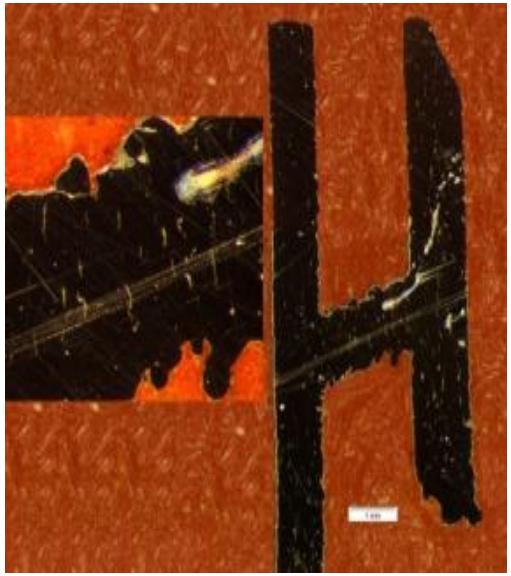


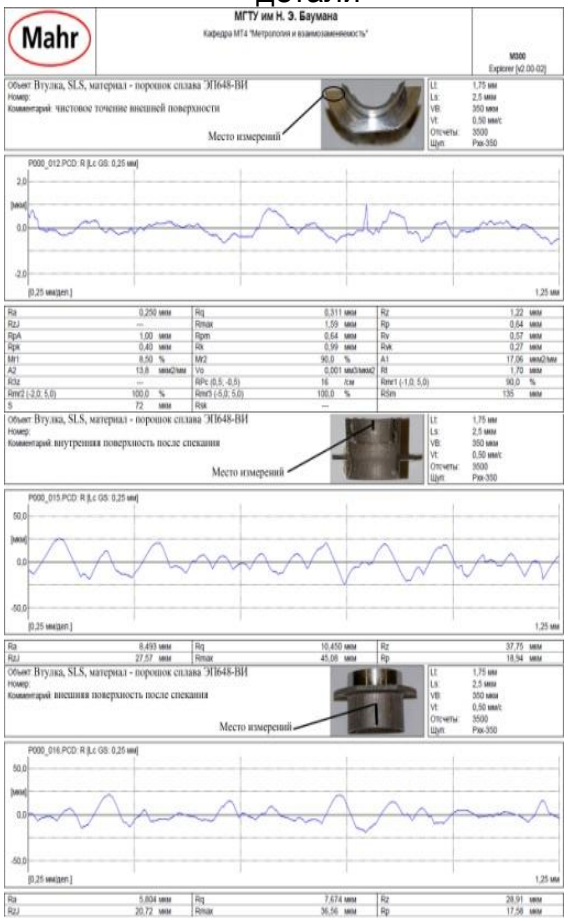
Fig. 13. Niche of thixo and PIM technologies in the modern blank production in engineering works. (on the top right) Classification of powders in conventional diameter d and the main consumers of the indicated types and sizes of particles.

AM (SLS) и/или PIM?
Практическая значимость выбора технологического маршрута

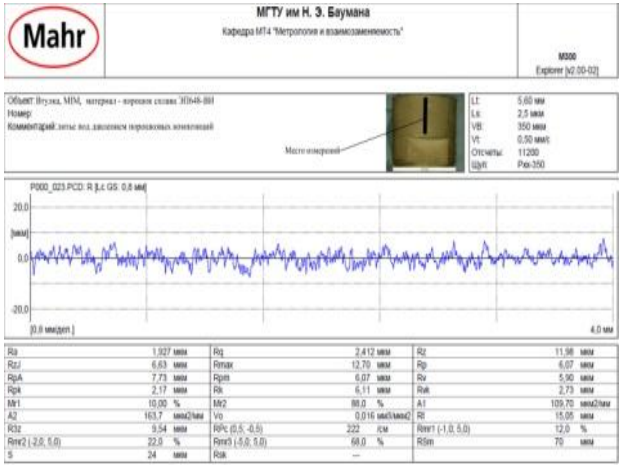
<u>Проблема</u>:
SLS- генерация безопорных поверхностей детали ведет к значительной шероховатости

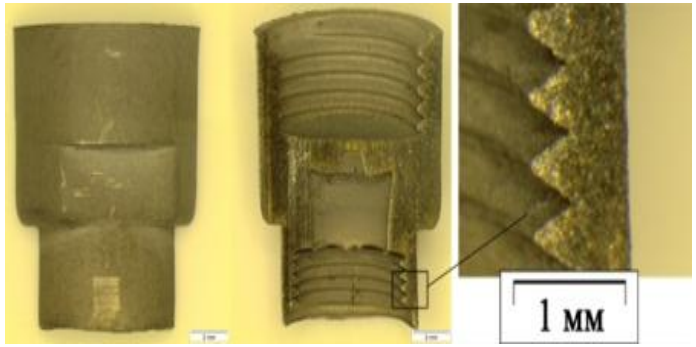


Шероховатость поверхностей SLS - детали



Шероховатость поверхностей PIM - детали

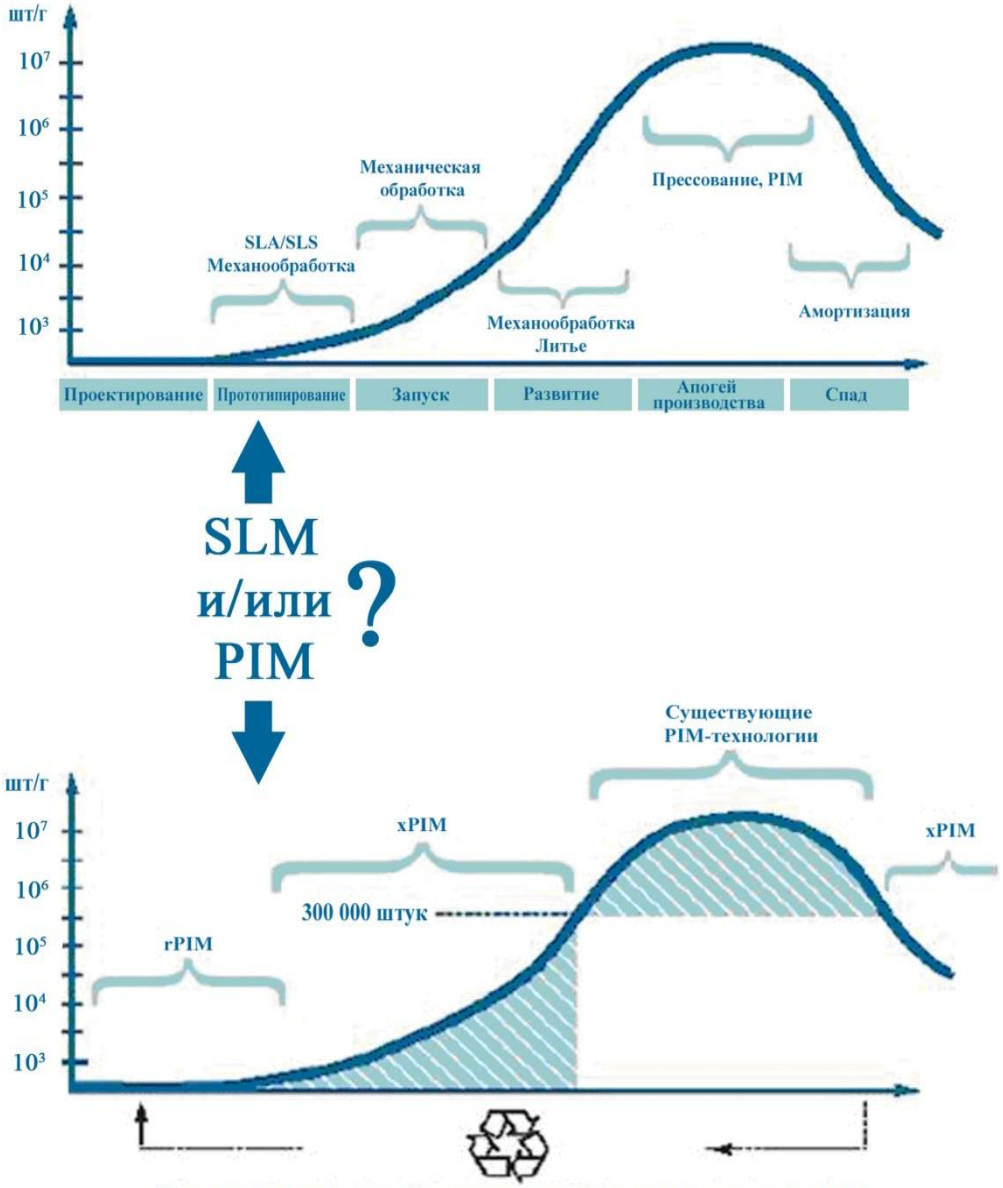




На фотографии одна из конструкций завихрителя авиационного двигателя, представленных в открытой печати (2016-й год), изготовленная специалистами фирмы Alliance MIM SA (Франция). В конкуренции методов AM (SLS) и MIM, остро протекающей в Европе и США, специалисты фирмы отдали предпочтение MIM технологии. Сложная деталь диаметром 47мм изготовлена из жаропрочного порошкового никелевого сплава Hastelloy X (HX). Потенциально такая деталь могла бы быть изготовлена AM методом, но возникли сомнения в возможности организации всех поддержек, в гарантиях точности геометрии всех мелких отверстий и стоимости производства. Последнее обстоятельство оказалось самым решающим, поскольку требуемый объем производства составил более 1000 шт/год. Монолитное изделие получено совместным спеканием сборки из 4-х изготовленных отдельно зеленых деталей. В перспективе у фирмы MIM производство лопаток авиационных двигателей из жаропрочных сплавов, которые не могут быть получены традиционным литьем или изготовлены механической обработкой, длиной до 300 мм. Внизу – заключение о перспективах AM и MIM.

«AM is in the minds of many people linked to the digital world of Silicon Valley, whereas MIM is linked to industry. AM connects with creativity, MIM connects with cost reduction and production». **«AM – это для работников цифрового мира специалистов Силиконовой Долины, тогда как MIM – для специалистов промышленности.**
AM там, где творчество и созидание, MIM – там, где решаются вопросы производства и снижения стоимости продукции». PIM-International, Vol.10, N4, 2016**.**

AM (SLS) и PIM ? Выбор технологического маршрута специалистами фирмы PRATT & WHITNEY



Наземные испытания двигателя PW PW1524G, в котором использованы детали, изготовленные PIM и AM методами