

Комплексная инновационная технология неразрушающего контроля для обнаружения и количественной оценки ударных повреждений конструкций воздушных судов, изготовленных из полимерных композиционных материалов

**Научно-исследовательская лаборатория
перспективных методов испытаний и контроля состояния конструкций
Федеральное автономное учреждение
«Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского»**

**Смотрова Светлана Александровна,
д.т.н., начальник НИЛ-45 НИО-3 Центра прочности ЛА;**

**Смотров Андрей Васильевич,
к.т.н., ведущий научный сотрудник Центра прочности ЛА**

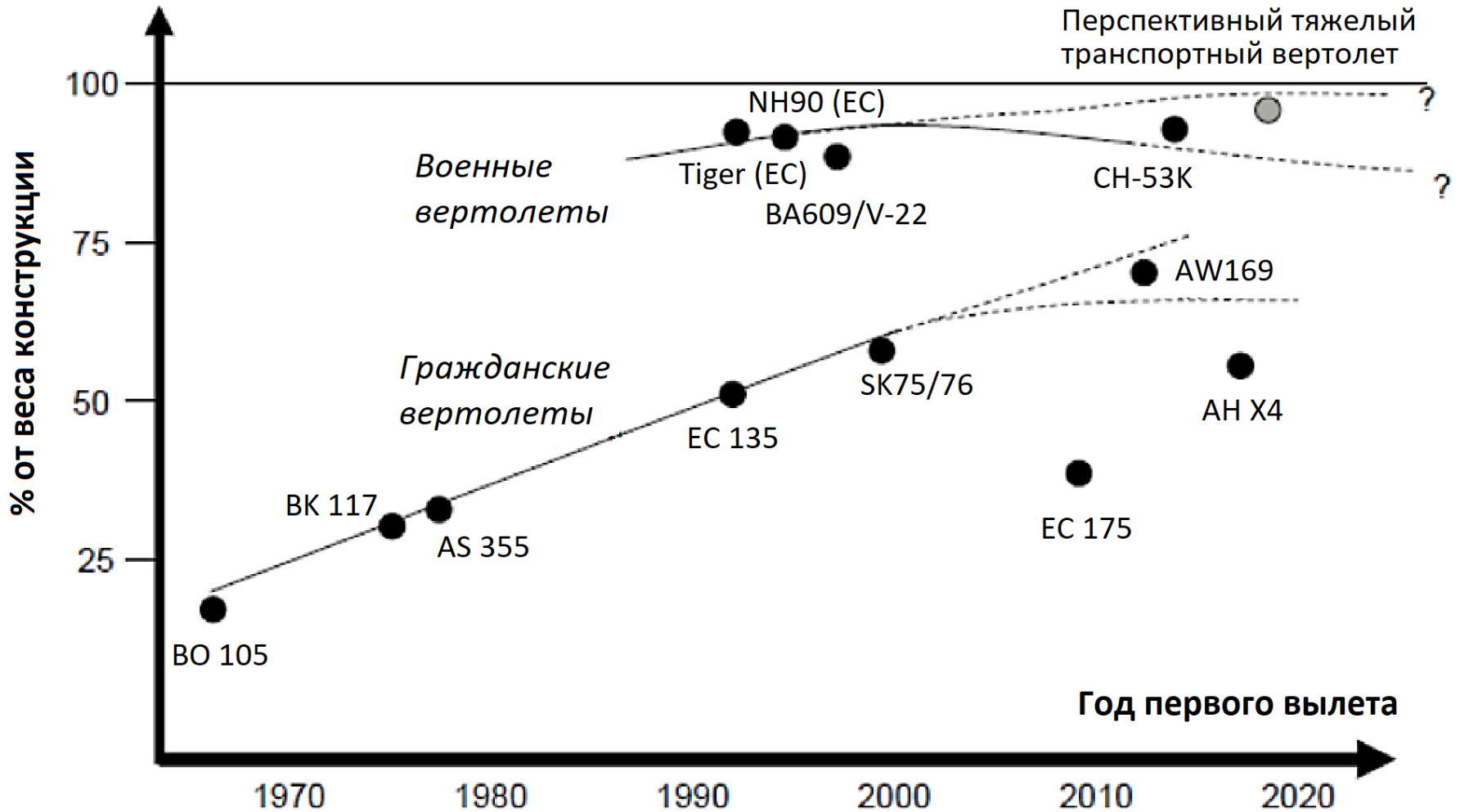
Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13019

Доля роста потребления ПКМ в Европе по различным секторам экономики, 2018-2023 годы



Источник: *Europe composites. March 2020.* – USA: U.S. Department of Commerce, U.S. Commercial Service; <https://www.export.gov/services>

Рост доли ПКМ в конструкции планера вертолетов зарубежного производства



Источник: Weber T.A., Ruff-Stahl H.-J.K. *Advances in Composite Manufacturing of Helicopter Parts / International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 2017. Vol.4. Iss.1; <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2017.1153>

Увеличение применения ПКМ (масс. %) в конструкции планера вертолетов разработки

ОКБ Камова –

хвостовые секции лопастей, элементы фюзеляжа, рулей направления, килей, стабилизатора, крыла, створок, дверей, антенных обтекателей и пр.



Многоцелевой вертолёт Ка-26
(год первого вылета – 1965,
доля ПКМ **6%**)



Многоцелевой вертолёт Ка-126
(год первого вылета – 1987,
доля ПКМ **17%**)



Противолодочный вертолёт Ка-27
(год первого вылета – 1973,
доля ПКМ **15%**)



Многоцелевой вертолёт Ка-62
(год первого вылета – 2016, доля ПКМ **55%**)



Ударный вертолёт Ка-50
(год первого вылета – 1982, доля ПКМ **35%**)

Рост применения ПКМ в 9 раз → экономия массы на 15-35 %

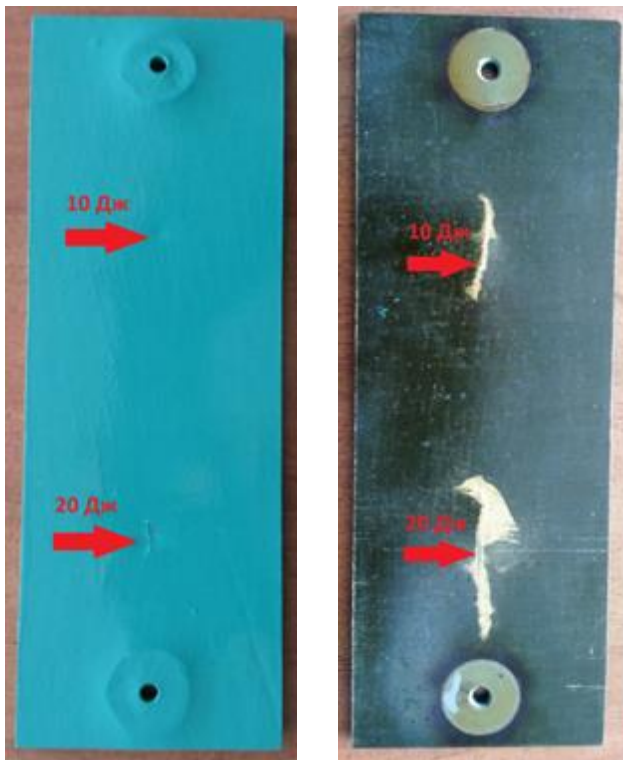
Источник: Горбунов Э.В., Лукасов В.В. *Использование композитов при производстве и эксплуатации воздушных судов / Актуальные проблемы авиации и космонавтики. Том 1, 2015. – С. 692-693*

Обобщенные количественные данные по эксплуатационным повреждениям агрегатов планера воздушного судна (на примере магистрального самолета)



Источник: Breuer U.P. *Commercial Aircraft Composite Technology*. – Switzerland: Springer International Publishing, 2016. – P.

Применение методов контроля для выявления поврежденных конструкций ЛА



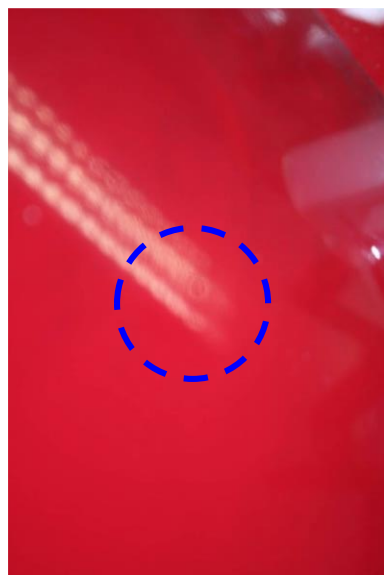
Низкоскоростные воздействия
(удары с малой энергией)
10 Дж ↔ 2,0 м/с; 20 Дж ↔ 2,8 м/с

- ❑ **Визуальный осмотр** является наиболее простым и доступным методом неразрушающего контроля, позволяет даже при местном освещении сравнительно быстро обнаруживать повреждения на поверхности конструкции.
- ❑ Производительность визуального осмотра почти в **100 раз** выше, чем **ультразвукового метода контроля**.
- ❑ Процедура визуального осмотра участка поверхности площадью $\approx 1 \text{ м}^2$ длится примерно **18 с**, а выполнение ультразвуковой диагностики требует **около получаса**

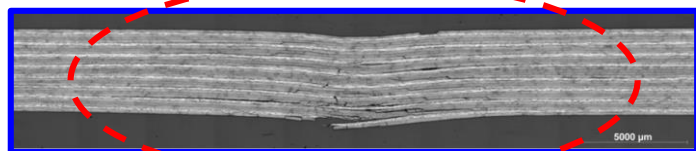
Основной недостаток визуального осмотра – принципиальная невозможность выявления внутренних несплошностей, не выходящих на поверхность изделия из ПКМ, кроме того, их истинный размер может значительно превышать видимые снаружи следы ударов

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) обладают существенным недостатком: в отличие от металлических сплавов, которые поглощают энергию ударного воздействия пластическим деформированием и практически сохраняющих при этом свою прочность, в **ПКМ** в момент удара происходит

хрупкое разрушение полимерной матрицы и армирующих волокон



A-A



Малозаметные ударные повреждения – МЗУП



Углепластиковые образцы после низкоэнергетических ударов

Результат удара: появление снаружи едва заметных повреждений, внутри и на оборотной стороне – расслоений и растрескиваний

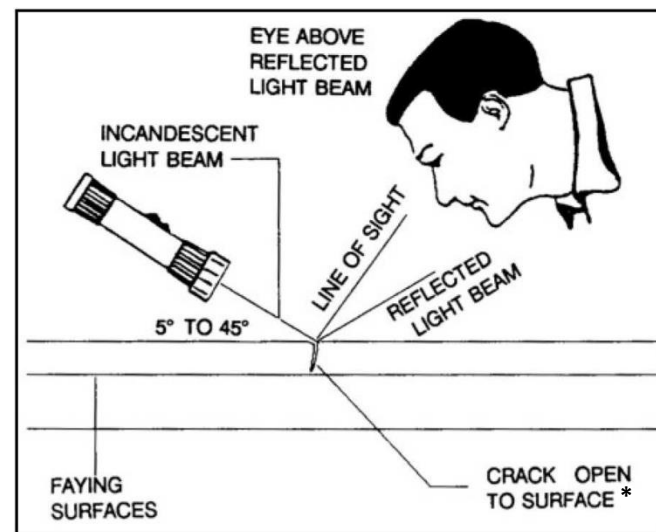
Источники:

- Nagelsmit M., Kassapoglou C., Gürdal Z. AP-PLY: A New Fibre Placement Architecture for Fabric Replacement / *SAMPE Journal*, Volume 47, No. 2, March/April 2011. P. 36-45.
- Baaran J. Visual Inspection of Composite Structures. EASA-Research Project/2007/3. Final Report. 09 July 2009. – Germany, Braunschweig: DLR. – 115 p.

Визуальный осмотр



- ▶ **90% всех процедур**, проводимых при использовании стандартных форм технического обслуживания авиаконструкций, относятся к визуально-измерительному контролю (ВИК),
- ▶ при проведении работ по обеспечению прочности авиаконструкций из ПКМ по условиям эксплуатационной живучести является классификация возникаемых в процессе эксплуатации ВС повреждений (**5 категорий по степени повреждения**) и надежности их обнаружения при ВИК

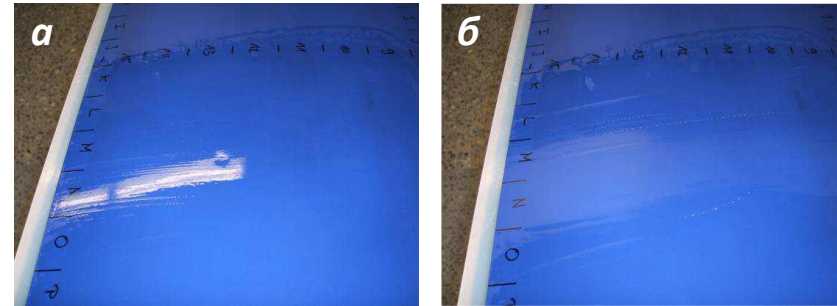


Источник: *Visual inspection for aircraft. FAA AC 43-204 (14 Aug. 1997).* – USA: Federal Aviation Administration, U.S. Department of Transportation, 1997. – 236 p.

► **ОСНОВА СТАНДАРТНОЙ МЕТОДИКИ** установления границы контролепригодности методов *неразрушающего контроля (НК)* – статистический анализ результатов серии испытаний при участии достаточно большого количества экспертов одной квалификации, которые должны при заданных в ходе эксперимента условиях обнаружить повреждения в предъявляемых им для контроля образцах с предварительно нанесенными в определенных зонах ударах с различной энергией.

► **ГЛАВНЫЕ ФАКТОРЫ**, влияющие на вероятность обнаружения повреждений (*Probability Of Detection – POD*) определенного размера на натуральных конструкциях при использовании визуального осмотра (ВИК) с избранной процедурой диагностики:

- состояние контролируемой поверхности (чистая / грязная, мокрая / сухая),
- текстура поверхности – вид обработки (диффузноотражающая или зеркальная, наличие грунтовочных или лакокрасочных/цветных покрытий и пр.),
- условия освещенности (например, естественный или искусственный свет, величина светности) и угол обзора,
- расстояние, с которого выполняется контроль, а также место расположения на объекте контроля (верхняя, нижняя или боковая поверхность)



Различие в обнаруживаемости ударных вмятин на мокрой (а) и сухой (б) матовой поверхности окрашенного элемента ВС

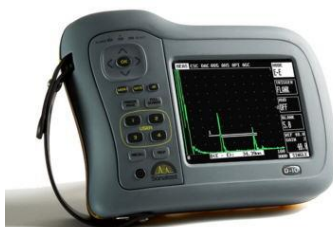
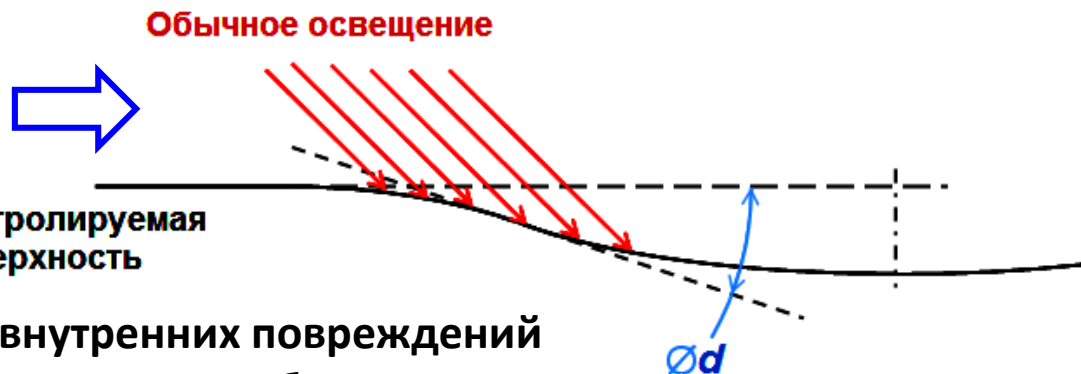
Источник: Baaran J. *Visual Inspection of Composite Structures*. EASA-Research Project/2007/3. Final Report. 09 July 2009. – Germany, Braunschweig: DLR. – 115 р.

ШТАТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ процедуры ВИК: обнаружение повреждений с помощью природного оптического прибора – человеческого глаза

Выполнено сравнение количественной оценки наружных и внутренних повреждений образцов ПКМ (углепластики) при использовании бесконтактного оптического устройства – профилометра и контактного ультразвукового дефектоскопа

Новый подход к оценке повреждений при ВИК:

- 1) обнаружение на ПКМ повреждений в виде вмятин,
- 2) измерение площади S поврежденного участка – области, где нарушена регулярность поверхностного слоя объекта контроля → снижение погрешности оценки внешней зоны разрушений



Дефектоскоп
Sonatest
SiteScan D20

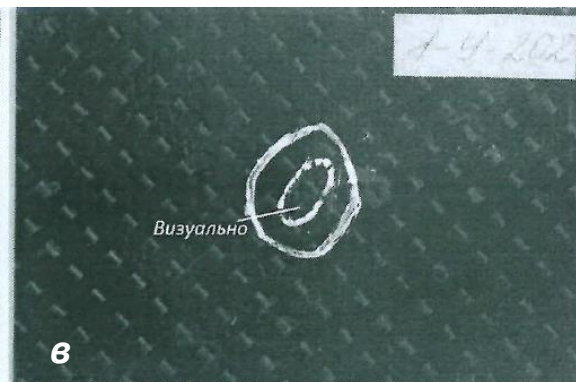
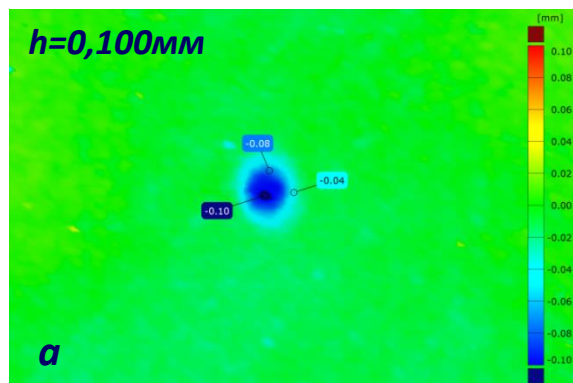


Совместная работа
с ООО «ЦИПАТ»

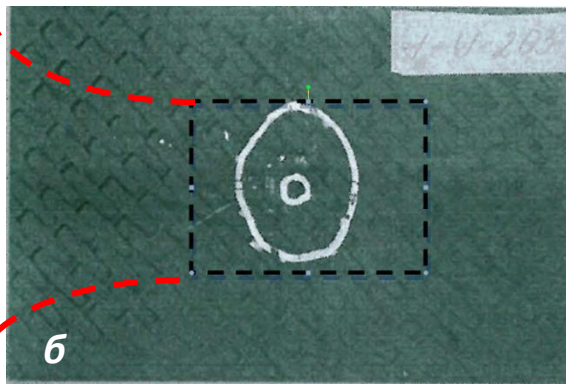
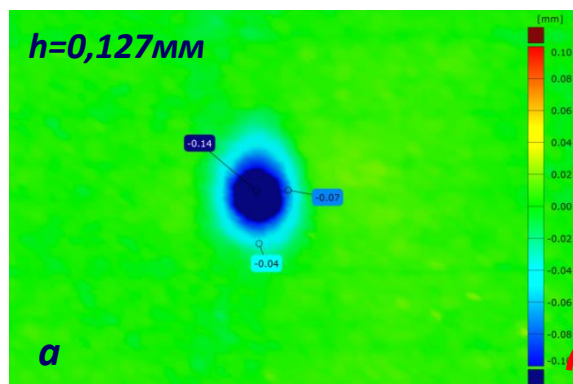
Оптическая
координатно-
измерительная
топометрическая
система
GOM ATOS Capsule 12M

- **ИССЛЕДОВАНЫ** элементарные образцы ПКМ в виде пластин размерами 150×100×6 мм с нанесенными нормированными повреждениями (от 5 до 45 Дж):
- углепластики на основе углеродной ленты-полотна 300-24К-200 (нить основа Toho Tenax IMS65 E23 24K) и связующего КНР-150; схемы укладки:
 - У1 – [+45°/0°/-45°/0°/0°/90°/0°/0°/-45°/0°/+45°]₃;
 - У2 – [-45°/90°/+45°/90°/90°/0°/90°/90°/+45°/90°/-45°]₃;
- **РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ:**
- УЗК-дефектоскоп → наибольшие протяженности выявленных разрушенных областей в образцах ПКМ как со стороны удара, так и с обратной стороны (L_1 – размер вдоль длинной стороны, L_2 – размер вдоль короткой стороны); определены осредненные площади эллипсов повреждений → $S_{УЗК} = (\pi \cdot L_1 \cdot L_2) / 4$;
 - оптическая профилометрия → измеренные площади S_{np} , глубины h_{np} , и объемы V_{np} вмятин от удара.
- **ВЫПОЛНЕННЫ:**
- оценка величин площадей S_{np} , глубин h_{np} , и объемы V_{np} визуально/оптически регистрируемых вмятин и площадей внутренних разрушенных областей $S_{УЗК}$ – зон расслоений и растрескиваний, выявленных референсным УЗК-методом;
 - определена остаточная прочность образцов на сжатие после удара $\bar{\sigma}_{\max}$

Сравнение количественной оценки наружных и внутренних повреждений образцов углепластиков в результате ударов

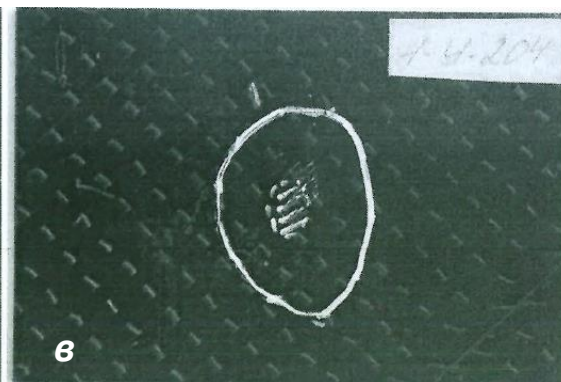
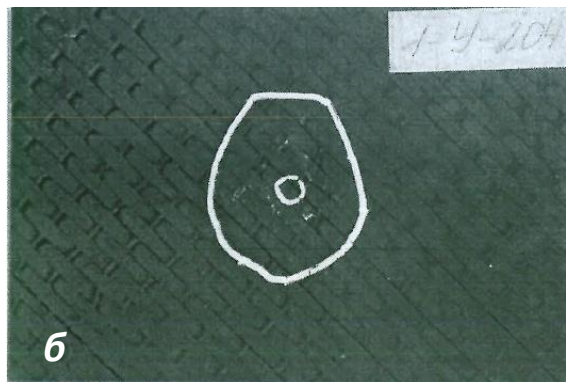
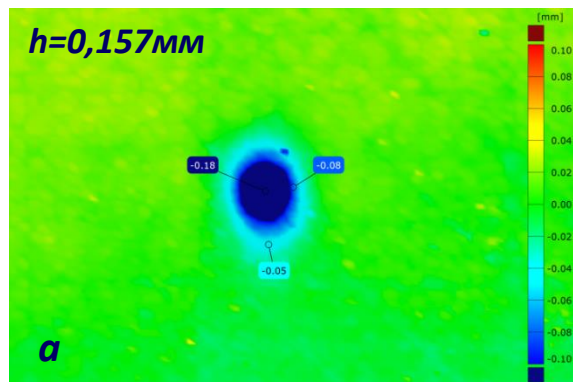


Результаты оценки ударного повреждения (10 Дж): **а** – оптическая профилометрия лицевой поверхности образца; **б** – УЗК со стороны удара, **в** – УЗК с обратной стороны

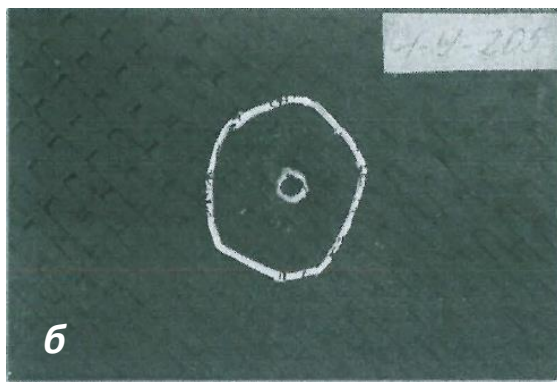
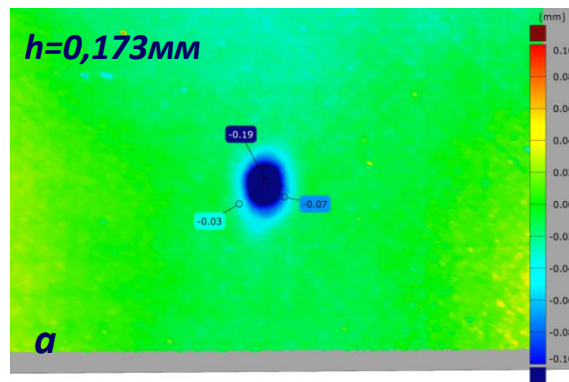


Результаты оценки ударного повреждения (15 Дж): **а** – оптическая профилометрия лицевой поверхности образца; **б** – УЗК со стороны удара, **в** – УЗК с обратной стороны

Сравнение количественной оценки наружных и внутренних повреждений образцов углепластиков в результате ударов

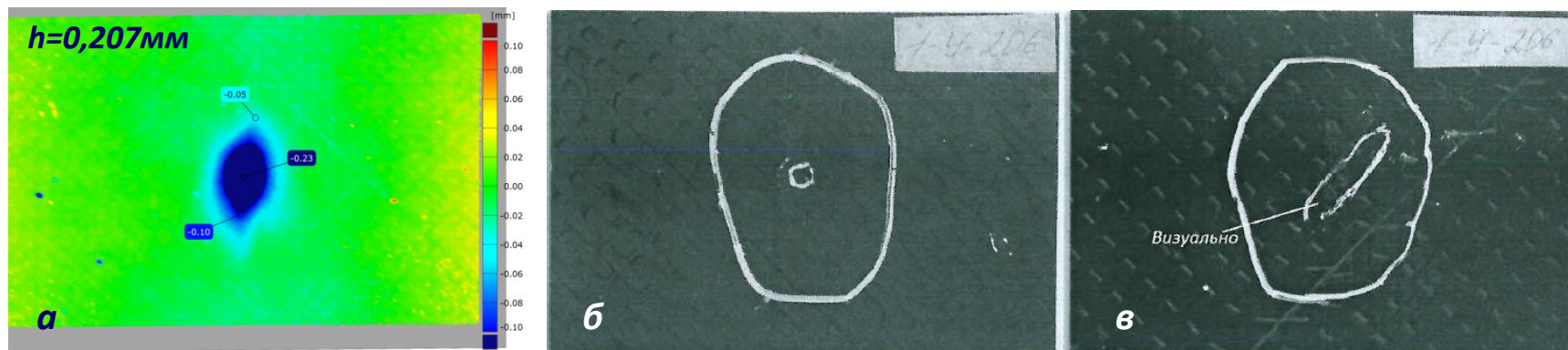


Результаты оценки ударного повреждения (20 Дж): **а** – оптическая профилометрия лицевой поверхности образца; **б** – УЗК со стороны удара, **в** – УЗК с обратной стороны

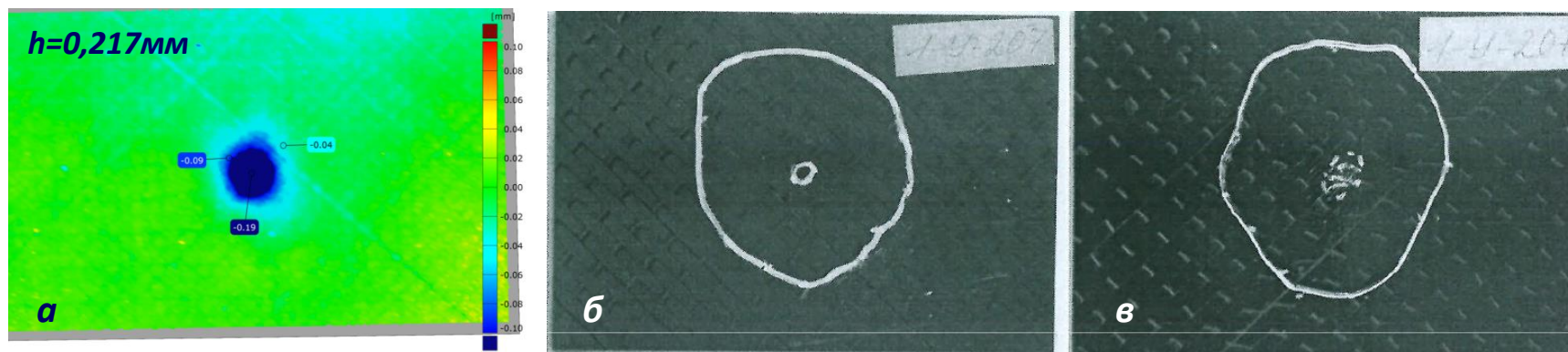


Результаты оценки ударного повреждения (25 Дж): **а** – оптическая профилометрия лицевой поверхности образца; **б** – УЗК со стороны удара, **в** – УЗК с обратной стороны

Сравнение количественной оценки наружных и внутренних повреждений образцов углепластиков в результате ударов

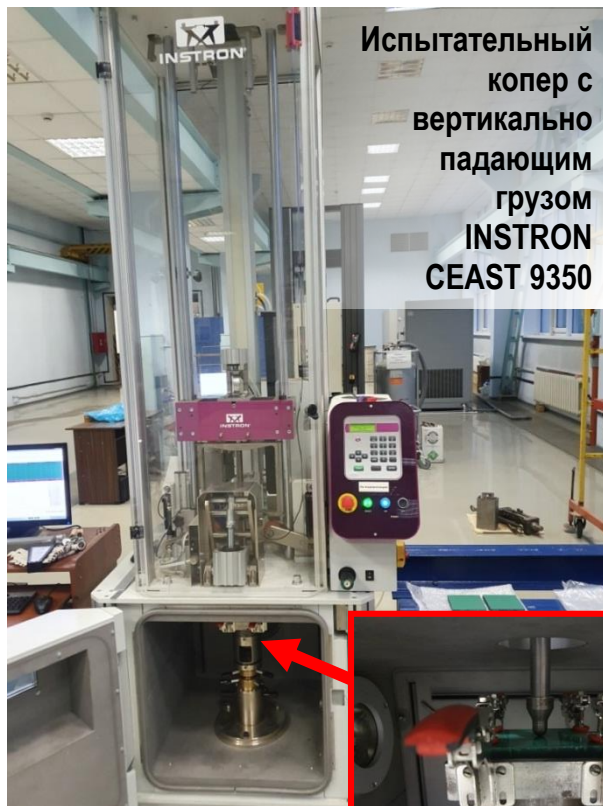


Результаты оценки ударного повреждения (35 Дж): *а* – оптическая профилометрия лицевой поверхности образца; *б* – УЗК со стороны удара, *в* – УЗК с обратной стороны



Результаты оценки ударного повреждения (45 Дж): *а* – оптическая профилометрия лицевой поверхности образца; *б* – УЗК со стороны удара, *в* – УЗК с обратной стороны

Снижение пределов прочности на сжатие углепластиковых образцов из-за наличия ударных повреждений



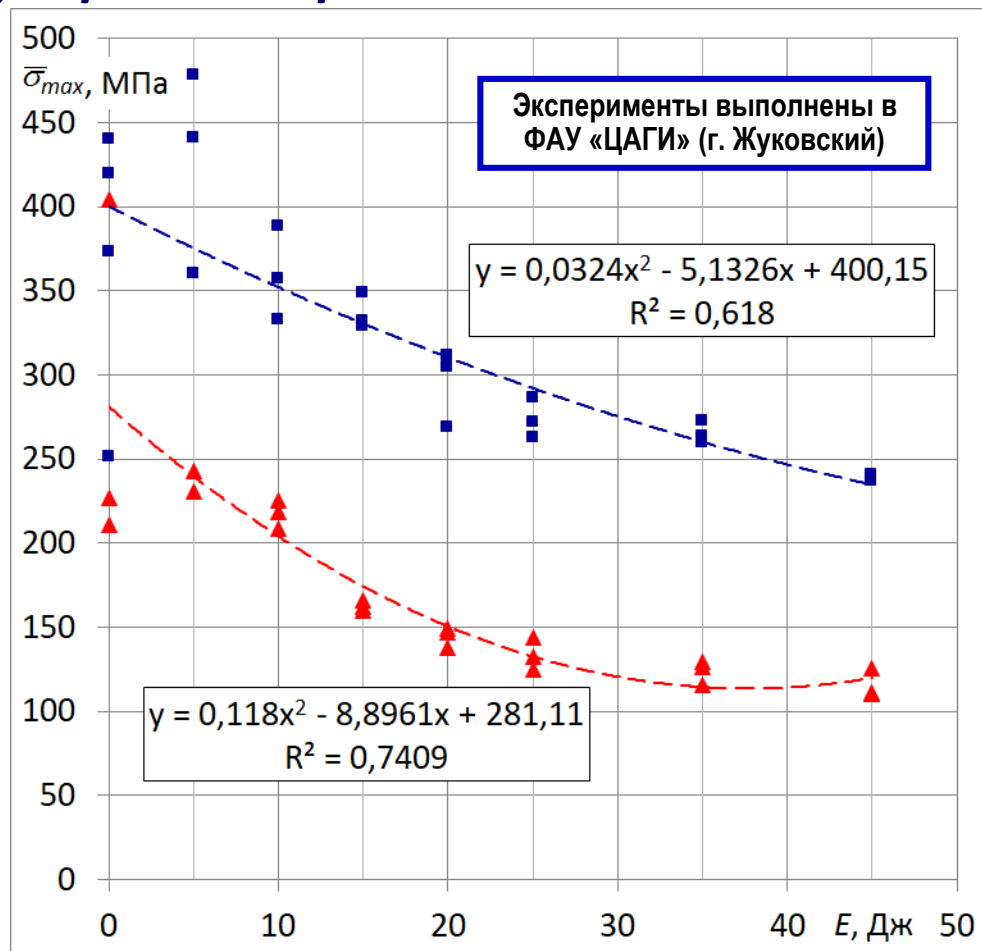
Испытательный копер с вертикально падающим грузом INSTRON CEAST 9350

Лабораторные испытания углепластиковых образцов (150×100×6 мм) с укладками:

■ – [+45 / 0 / -45 / 0 / 0 / 90 / 0 / 0 / -45 / 0 / +45]₃,

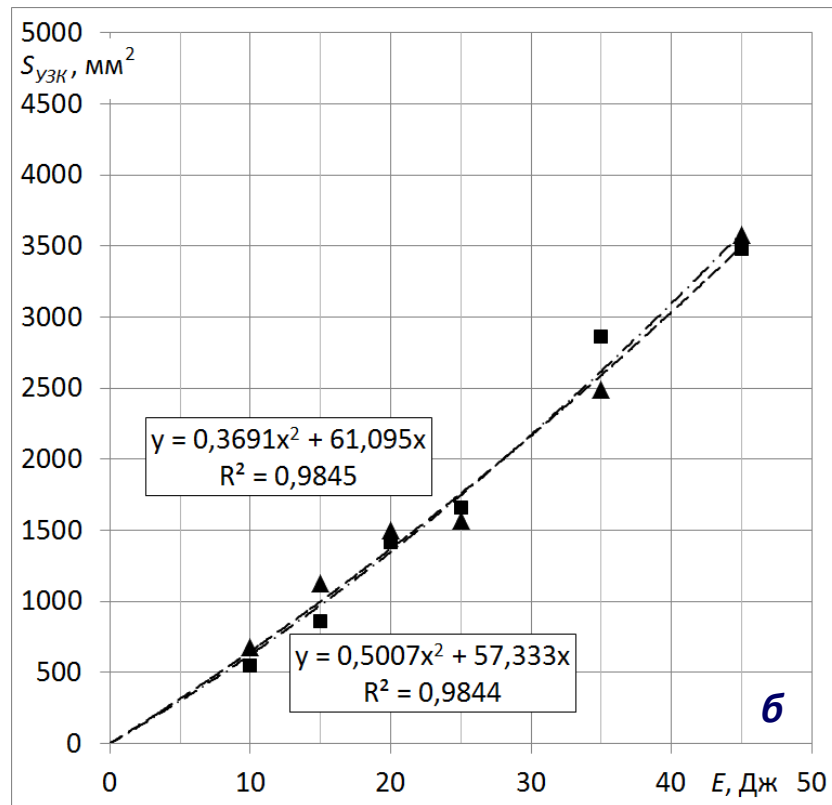
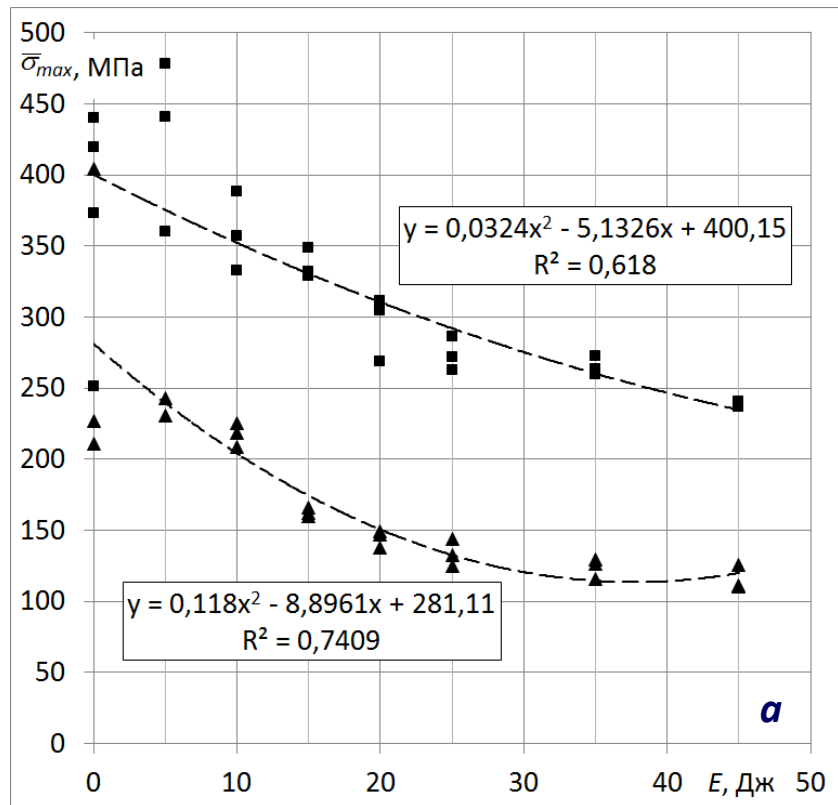
▲ – [-45 / 90 / +45 / 90 / 90 / 0 / 90 / 90 / +45 / 90 / -45]₃

Определение прочности на сжатие после нанесения нормированных ударов «по нормали» полусферическим (Ø 25,4 мм) бойком ($m = 5,5$ кг) по ГОСТ 33496-2015



При достижении порогового значения энергии удара $E = 45$ Дж пределы прочности при сжатии $\bar{\sigma}_{max}$ снижаются более чем в 2 раза (причем $E = 45$ Дж соответствует скорость около 4,2 м/с)

Исследование взаимосвязи прочности при сжатии и параметров ударных повреждений образцов углепластиков



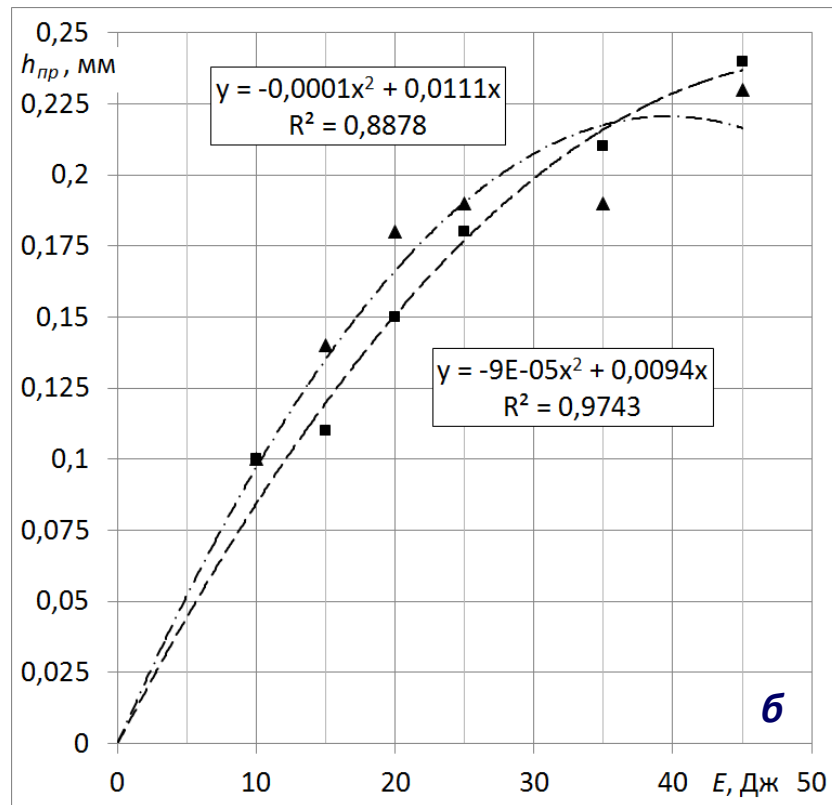
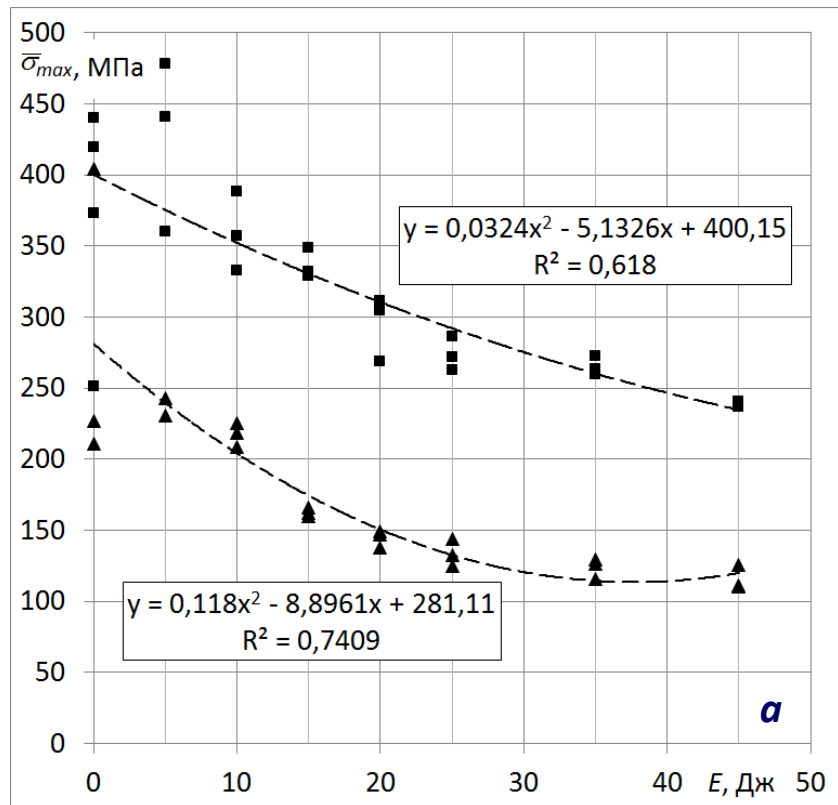
Математические модели полиномиальной связи энергии удара с остаточной прочностью образцов на сжатие (а)

и зарегистрированной с помощью УЗК площадью разрушений (б):

■ – тип У1 – углепластик с укладкой $[+45/0/-45/0/0/90/0/0/-45/0/+45]_3$;

▲ – тип У2 – углепластик с укладкой $[-45/90/+45/90/90/0/90/90/+45/90/-45]_3$

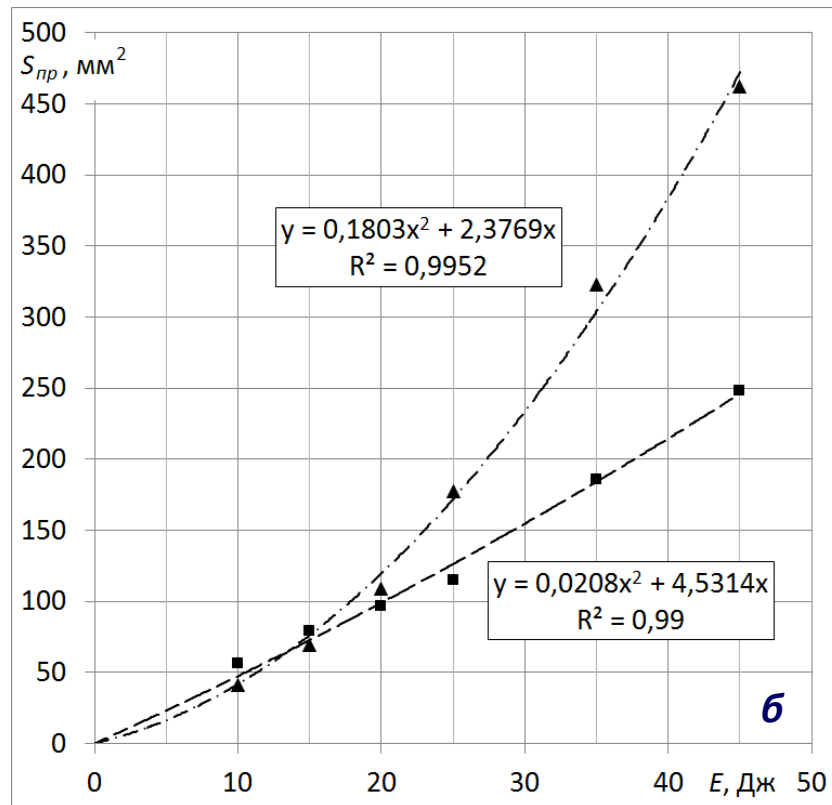
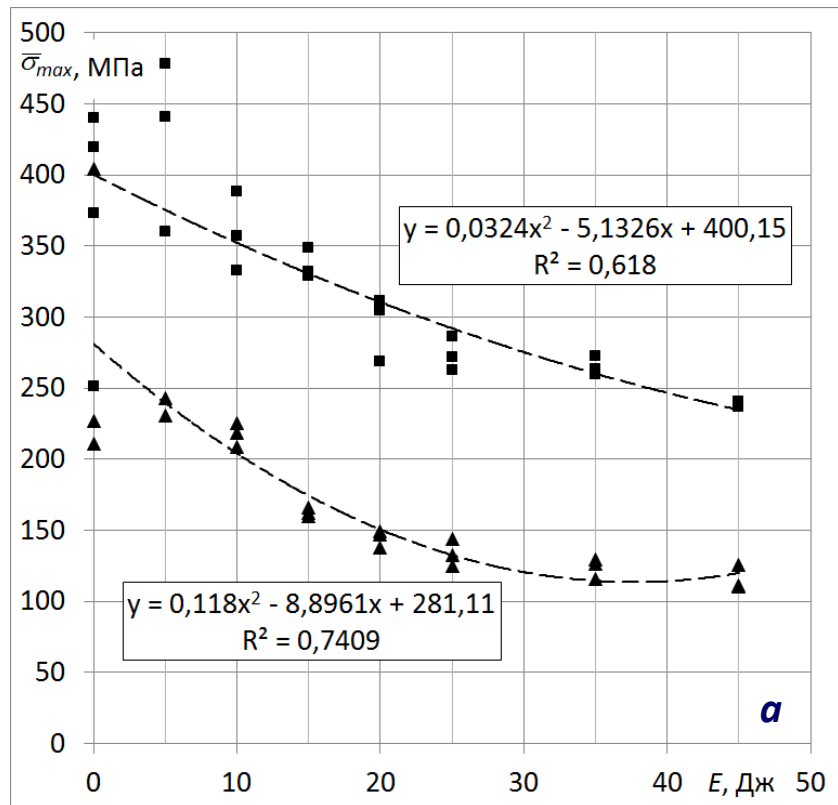
Исследование взаимосвязи прочности при сжатии и параметров ударных повреждений образцов углепластиков



Математические модели полиномиальной связи энергии удара с остаточной прочностью образцов на сжатие (а) и зарегистрированной с помощью профилометрии глубины ударной вмятины (б):

- – тип У1 – углепластик с укладкой $[+45/0/-45/0/0/90/0/0/-45/0/+45]_3$;
- ▲ – тип У2 – углепластик с укладкой $[-45/90/+45/90/90/0/90/90/+45/90/-45]_3$

Исследование взаимосвязи прочности при сжатии и параметров ударных повреждений образцов углепластиков



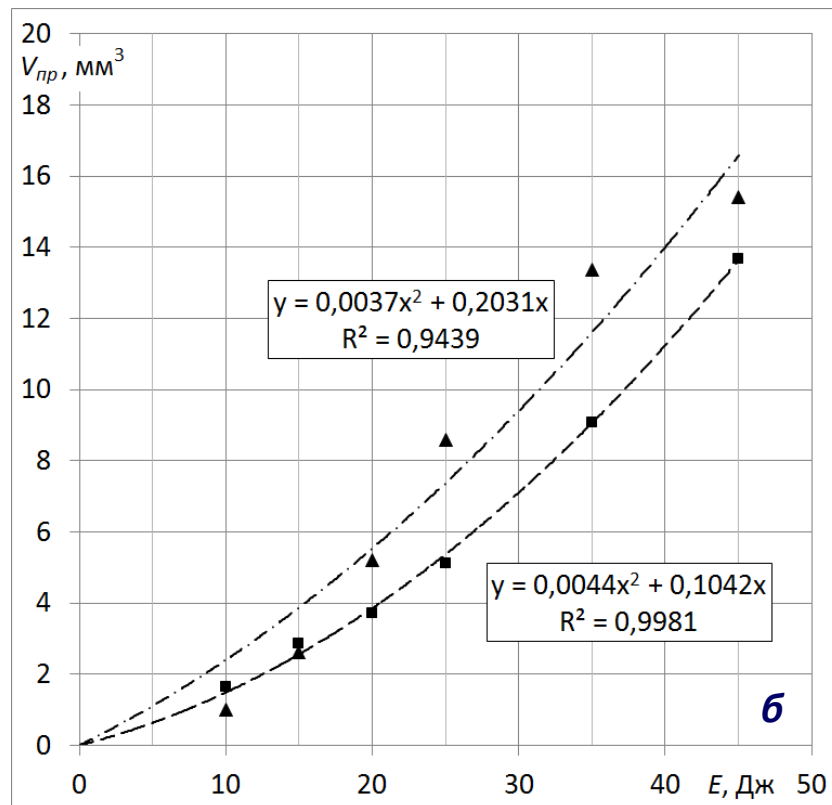
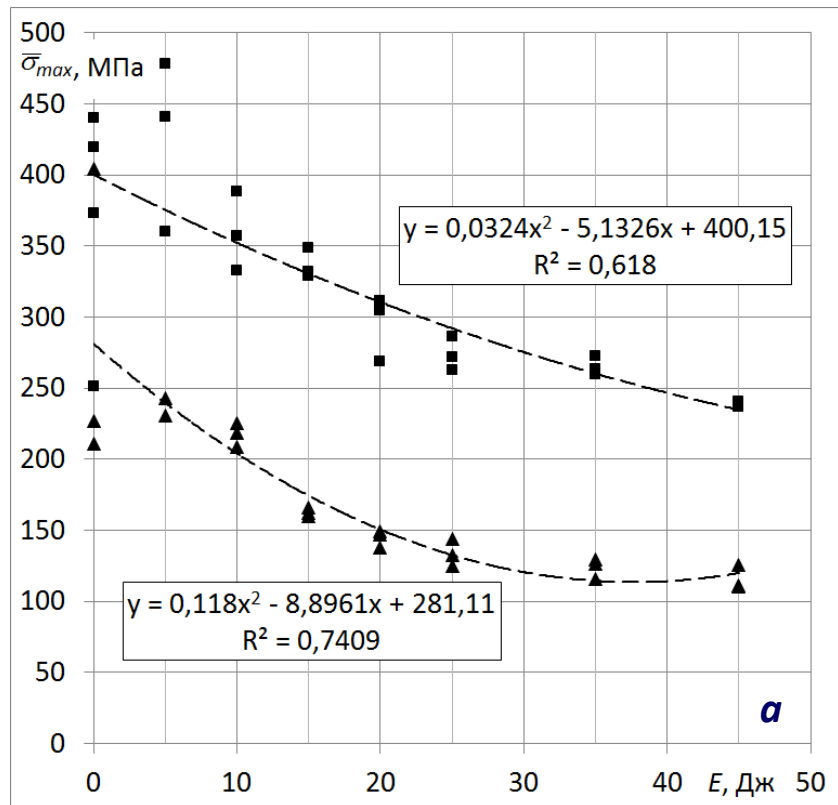
Математические модели полиномиальной связи энергии удара с остаточной прочностью образцов на сжатие (а)

и зарегистрированной с помощью профилометрии площади ударной вмятины (б):

■ – тип У1 – углепластик с укладкой $[+45/0/-45/0/0/90/0/0/-45/0/+45]_3$;

▲ – тип У2 – углепластик с укладкой $[-45/90/+45/90/90/0/90/90/+45/90/-45]_3$

Исследование взаимосвязи прочности при сжатии и параметров ударных повреждений образцов углепластиков



Математические модели полиномиальной связи энергии удара с остаточной прочностью образцов на сжатие (а)

и зарегистрированной с помощью профилометрии объема ударной вмятины (б):

■ – тип У1 – углепластик с укладкой [+45/0/-45/0/0/90/0/0/-45/0/+45]₃;

▲ – тип У2 – углепластик с укладкой [-45/90/+45/90/90/0/90/90/+45/90/-45]₃

Выводы по исследованию повреждаемости углепластиков

- 1) Применение ВИК с использованием компьютеризированного сканирующего оптического координатно-измерительного топометрического профилометра показало, что величины площадей визуально/оптически регистрируемых последствий ударов (вмятин) на поверхности образцов ПКМ на порядок меньше разрушенных внутренних областей (расслоений и растрескиваний), выявленных референсным УЗК-методом.**
- 2) Метод УЗК дает существенно больше информации о поврежденности объектов, чем лабораторный контроль с использованием визуальных/оптических лабораторных установок, при этом корреляционные связи для коэффициента детерминации $R^2(S_i)$ при графическом представлении регрессионных моделей зависимостей площадей повреждений S_i от энергии ударов E для обоих использованных методов практически одинаковы.**
- 3) Производительность ВИК в ≈ 100 раз выше*, чем УЗК-метода \rightarrow существенно больше стоимость процедур УЗК по сравнению с использованием ВИК.**
- 4) При оценке наружных повреждений в виде вмятин предложено вместо глубины применять другой показатель – площадь несплошности образца/конструкции, так как при равной глубине вмятины от удара фактический размер разрушений (как внутренних, так и внешних) может сильно отличаться**

* Процедура визуального осмотра участка поверхности площадью 1 м^2 длится ≈ 18 с, а выполнение УЗК – 0,5 часа

Модернизируемый метод при использовании НТЗ по прибору ЛУИВ

Программа SOLIRT (проект «Теплый свет»)

Метод неразрушающего контроля

Оцениваемая характеристика	Визуальный осмотр	Акустический контроль методом простукивания молотком	Акустический импедансный экспресс-контроль	Ультразвуковой контроль (УЗК)			Метод сдвиговой интерферометрии (нагрев / вакуум)	Метод термографии (периодический нагрев / пошаговый нагрев)
				Переносной УЗК дефектоскоп с функцией визуализации внутренней структуры	Переносной УЗК дефектоскоп на основе фазированных решеток	Автоматизированный УЗК дефектоскоп на основе фазированных решеток		
Обнаруживаемое повреждение	Удар	+	+	0 / +	+ / ++	++	++	+
	Расслоение	-	0	0	++	++	++	- / 0
	Непроклей	-	0	0	+	+ / ++	++	0
Размер дефекта	-	0	0	+	++	++	+	+
Исследование дефектов в глубине материала	-	-	-	+	++	++	-	-
Мобильность (портативность)	++	++	++	+	+	+	+	0
Размер исследуемой области	~ 1 м ²	точка	точка	25 мм ²	68 мм ²	5-100 мм ²	220×160 мм	~ 1 м ²
Наличие контактной среды	нет	нет	нет	да	да	минимально	нет	нет
Производительность	++	0	0	+	+	+	+	++
Требования к персоналу (уровень обучения)	низкие	низкие	высокие	средние	высокие	высокие	высокие	высокие
Затраты на оборудование, тыс. €	0	< 10	12-16	40-60	40-60	95-110	100-120	130-150

Примечание: «зеленый» – хорошо, «желтый» – с ограничением, «красный» – плохо

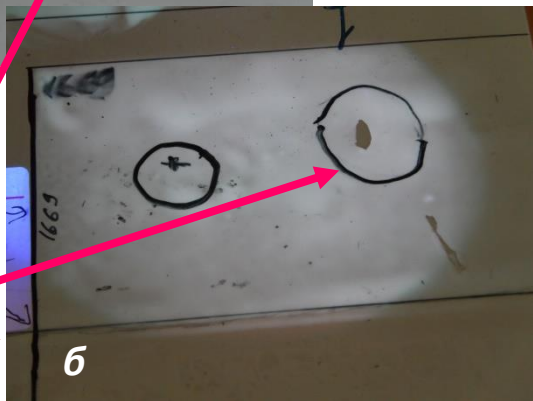
Источник: J.H. Heida, D.J. Platenkamp. 18th World Conference on Nondestructive Testing (16-20 April 2012, Durban, South Africa), 2012.

Ударочувствительные покрытия — НОВОЕ СРЕДСТВО локализации (визуализации) и оценки мест ударных повреждений в ПКМ

Поверхности испытанных 3-х стрингерных углепластиковых панелей, окрашенных типовыми ЛКП, при обычном (а) и УФ-облучении (б) с нанесенными ударочувствительными люминесцентными смарт-покрытиями (ЛСП)

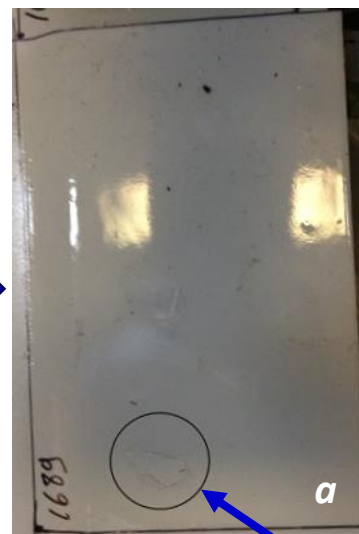


Удар: под $\angle 45^\circ$, цилиндр с шаровым закруглением на конце $\varnothing 42\text{мм}$, масса 660г



ЛСП (тип 1)

Удар 19,4 Дж



Удар: под $\angle 80^\circ$, цилиндр $\varnothing 42\text{мм}$, масса 660г, высота сброса 1 м



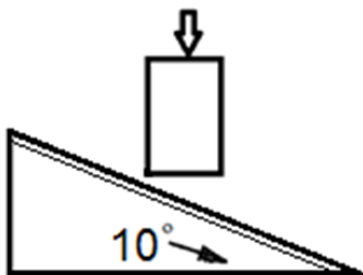
ЛСП (тип 2)

Удары 6,5 Дж

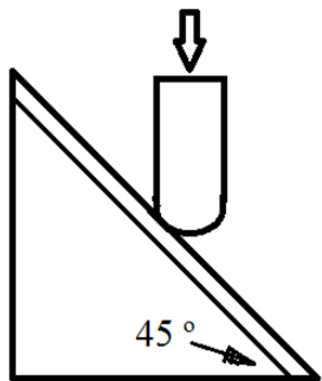
Достигнут 7-й уровень готовности технологии (УГТ-7):

- разработан состав (рецептура) ЛСП (*патент RU 2644917*), разработан способ нанесения покрытия и выявления дефектов (*патент RU 2645431*);
- разработана *технологическая инструкция* по созданию, нанесению и хранению материалов УИП (*ТИ-511-2020-01*);
- разработан проект *стандарта организации* СТО ЦАГИ (*инв.№5499*)

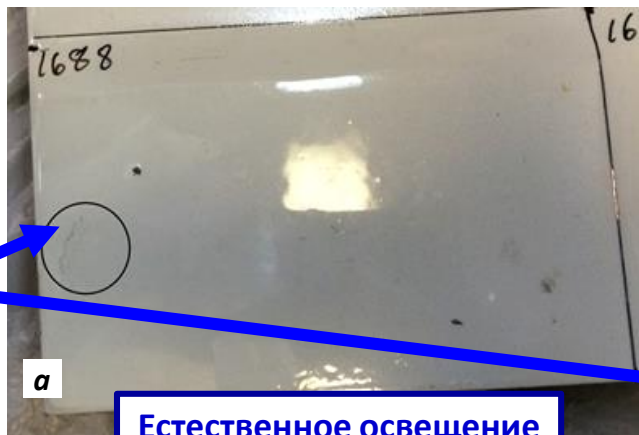
Обнаружение малозаметных ударных повреждений на авиационных конструкциях из ПКМ с применением ударочувствительных смарт-покрытий (Проект «УИП»)



боёк \varnothing 42 мм
(удар ребром),
энергия удара
19,5 Дж



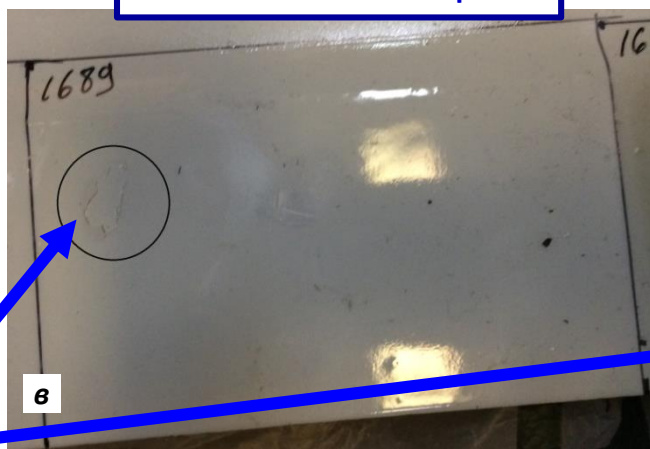
боёк \varnothing 42 мм,
энергия удара
19,4 Дж



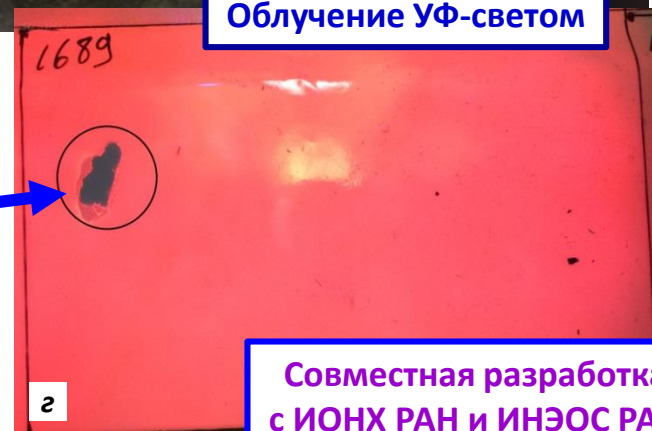
Естественное освещение



Облучение УФ-светом



Поверхность 3-х стрингерной панели из ПКМ, окрашенной типовым ЛКП с нанесенным ударочувствительным покрытием – ЛСП



Совместная разработка
с ИОНХ РАН и ИНЭОС РАН

Характеристики ударочувствительного смарт-покрытия

- 1. Покрытие не имеет окраски (является прозрачным).**
- 2. Обладает хорошей адгезией к типовым авиационным лакокрасочным материалам**
- 3. Стойкость материала к внешним воздействиям :**
 - 3.1. устойчиво к воздействию атмосферных факторов, включая тропические условия,**
 - 3.2. сохраняет термическую стабильность в интервале температур от -60° до $+100^{\circ}\text{C}$,**
 - 3.3. устойчиво к воздействию плесневых грибков,**
 - 3.4. устойчиво к действию минеральных масел и органических растворителей.**
- 4. Толщина одного слоя покрытия 20-30 мкм (при рекомендованном 2-слойном нанесении).**
- 5. Средний расход лака на 1 слой из расчета на сухую пленку около 50г/кв.м.**
- 6. Лак наносится при помощи краскораспылителя (краскопульты)**
- 7. Лак-основа промышленно производится по ТУ**

Применение ЛСП повышает эффективность визуального осмотра



Проведение визуально-измерительного контроля образцов ПКМ с использованием ударочувствительного смарт-покрытия

► Повреждаемость

оценивалась по величинам площадей S вмятин от ударов – видимых площадей ударных повреждений (не сплошностей);

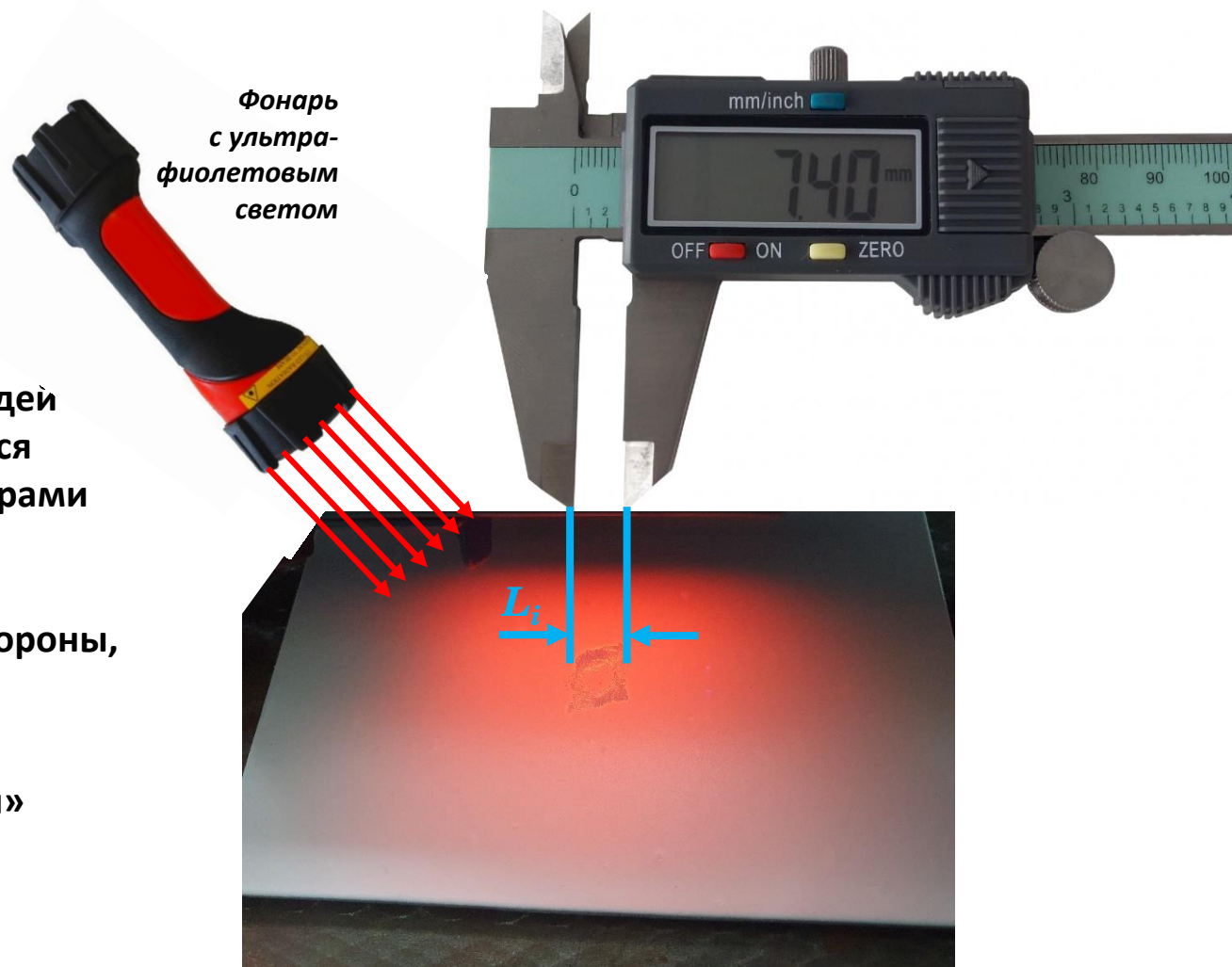
► расчет осредненных площадей вмятин от ударов производился по двум измеренным операторами размерам, полученным из протоколов эксперимента:

L_1 – размер вдоль длинной стороны,

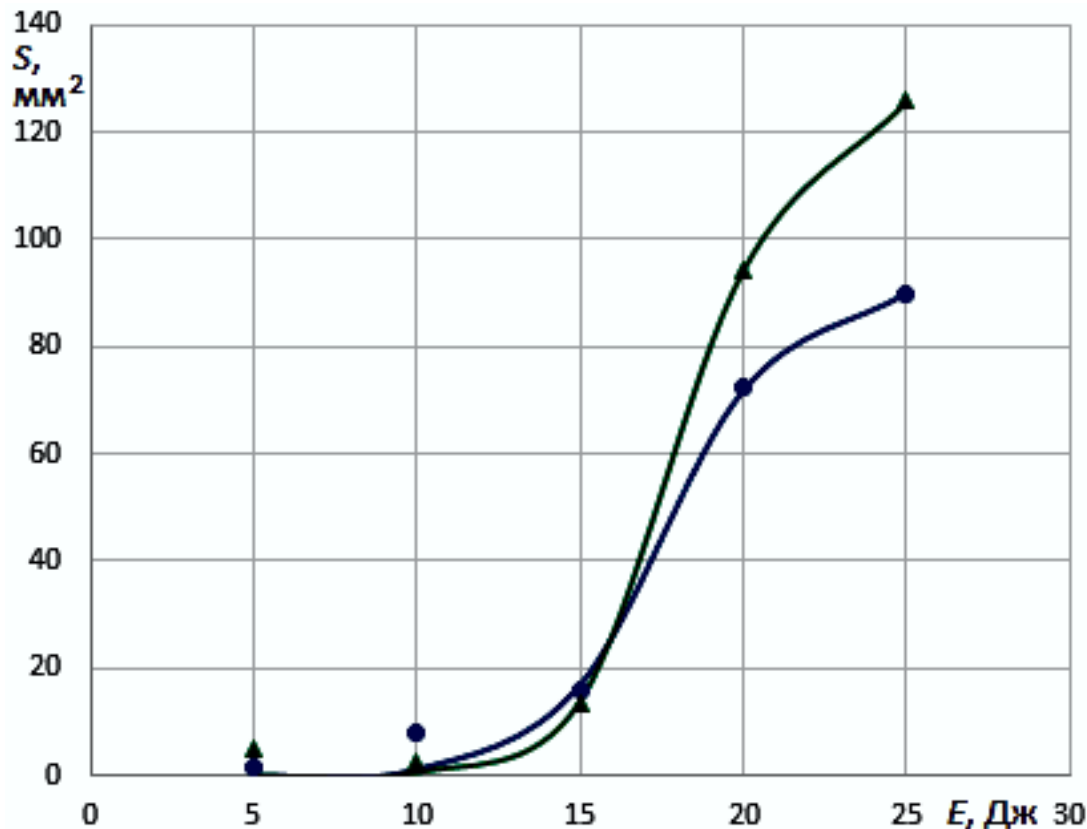
L_2 – размер вдоль короткой стороны;

► площадь «эллипса вмятины» рассчитывалась по формуле:

$$S = (\pi \cdot L_1 \cdot L_2) / 4$$



Проведение визуально-измерительного контроля образцов ПКМ с использованием ударочувствительного смарт-покрытия



▲ – ВИК с использованием ударочувствительного покрытия и УФ-освещения,
 ● – ВИК при естественном освещении (штатный визуальный осмотр)

Для аппроксимации зависимости осредненной площади повреждения S от энергии ударного воздействия E использовалась функция класса «сигмоид» – логистическая функция:

$$S = \frac{1}{a + b e^{-cE}}$$

Зависимости повреждаемости углепластиковых образцов, определенной по данным ВИК, от значений энергии ударов E

Летные испытания

2-местный самолет *Sigma-7*



Технология применения УИП (УГТ-7) включает проект СТО СМК ЦАГИ и технологическую инструкцию, защищена патентами RU 2644917 С1, RU 2645431 С1

Аэродром Авиацентра «Воскресенск» (д. Гостилово, Воскресенский р-н, Московская обл.)



2020 год

Обтекатели шасси из ПКМ с нанесенным ЛСП



Естественное освещение

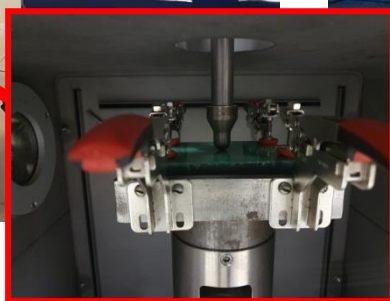


Облучение УФ-светом

Испытательный копер с вертикально падающим грузом INSTRON CEAST 9350



Лабораторные испытания образцов по нанесению нормированных ударов «по нормали» полусферическим ($\varnothing 25,4$ мм) бойком ($m = 5,5$ кг). ГОСТ 33496-2015



Актуальность проблемы создания лазерно-ультразвукового прибора НК

- Для обеспечения безопасности полетов ВС, имеющих в планере агрегаты и элементы из ПКМ, необходимы эффективные и надежные методы неразрушающего контроля (НК) для выявления областей/зон конструкции, в которых имеются внутренние **несплошности – производственные дефекты и эксплуатационные повреждения**. Обеспечение назначенных показателей надежности и долговечности композитных элементов ВС базируется на результативных технологиях НК, среди которых в настоящее время наибольшее применение получил **ВИЗУАЛЬНЫЙ ОСМОТР**. Он является самым простым, доступным и рентабельным методом, однако принципиально не позволяет выявлять несплошности, не выходящие на поверхность композитной конструкции, а также последствия низкоэнергетических ударных воздействий (до 45 Дж) в виде **малозаметных ударных повреждений (МЗУП)**.
- Количественную оценку несплошностей проводят при помощи **УЛЬТРАЗВУКОВЫХ (УЗ) ДЕФЕКТОСКОПОВ**, которые имеют существенные недостатки:
 - «слепая» приповерхностная зона размером до 2,5 мм (в конструкциях из ПКМ) и до 6 мм (в конструкциях из металлических сплавов);
 - сложность интерпретации результатов контроля ПКМ из-за множественных переотражений УЗ сигнала;
 - ограничения по размеру обнаруживаемых повреждений и дефектов (диаметром до 2 мм);
 - значительные временные затраты на контроль (≈ 30 мин./м²);
 - высокие требования к квалификации персонала;
 - большая стоимость зарубежных УЗ приборов (≈ 150 тыс. евро)

Сравнение процедур штатного неразрушающего контроля

Метод контроля	Размер дефекта / повреждения	Толщина наружного слоя	Длительность процедуры контроля (время, необходимое на проведение контроля)
Ультразвуковой контроль (изображение С-типа)	<< 70×30 мм	> 8 мм	Значительная, потому что процедура контроля трудоемкая <ul style="list-style-type: none"> ▪ Пример: период контроля для натурной конструкции килея (две панели): >> 1 рабочий день²⁾
Шерография (сдвиговая интерферометрия)	70×30 мм 100×30 мм 120×30 мм ²⁾	3,0 мм 5,5 мм 8,0 мм ²⁾	Малая, т.к. применяется измерение сразу по 2-м координатам, то контроля происходит быстро <ul style="list-style-type: none"> ▪ Измерение: <1 мин. ▪ Область контроля: 400×300 мм ▪ Пример: период контроля для натурной конструкции килея (две панели): = 1 рабочий день (8 час.)²⁾
Импульсная термография ¹⁾	70×60 мм 100×30 мм 180×60 мм ²⁾	1,0 мм 2,0 мм 3,0 мм ²⁾	Малая, т.к. применяется измерение сразу по 2-м координатам, то контроля происходит быстро <ul style="list-style-type: none"> ▪ Измерение: <1 мин. ▪ Область контроля: 400×300 мм ▪ Пример: период контроля для натурной конструкции килея (две панели): = 1 рабочий день (8 час.)²⁾

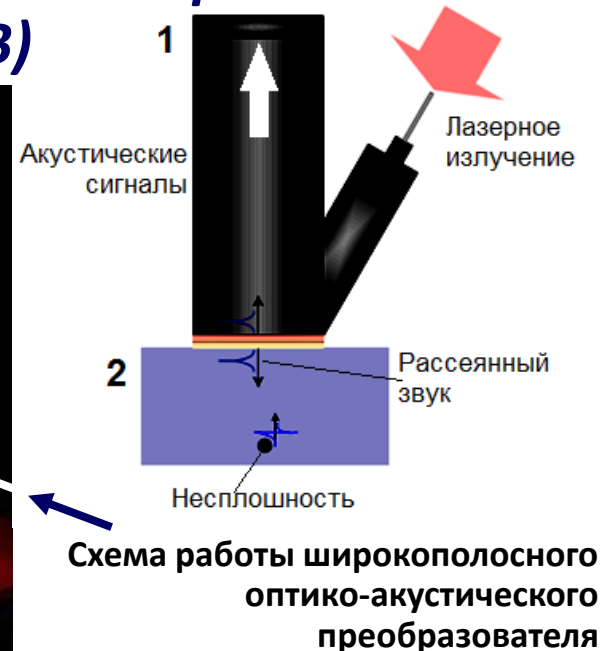
Примечания:

1) Необходимое дальнейшее развитие метода

2) Данные приведены для диагностики повреждений, которые необходимо было зарегистрировать в натурных конструкциях килей самолета Airbus A320

Источник: Schiller D., Scherling D., Bisle W. Experience with conventional and new NDI-inspections on fiber reinforced plastic (FRP) structures / Proceedings of 43rd Annual ATA NDT FORUM "NDT - Back to Basics for the Future" (Atlanta, Georgia, USA, October 4-7, 1999)

Лазерно-ультразвуковой управляемый измеритель глубины вмятины (ЛУИВ)



- толщина исследуемого поверхностного слоя ПКМ – от 0 до 20 мк в зависимости от акустической проводимости материала;
- количественная и качественная оценка **малозаметных ударных повреждений** – (глубина вмятины, размер в плоскости и рельеф поверхности повреждения);
- количественная и качественная оценка покрытий (толщина и качество покрытия);
- количественная и качественная оценка внутренних **несплошностей** – технологических дефектов и эксплуатационных повреждений (посторонние включения, непроклеи, пустоты, поры, расслоения, свильность);
- определение модуля упругости и плотности исследуемого материала

Преимущества ЛУИВ:

Применение действующего макета ЛУИВ на образцах

Лицевая сторона
образца после
удара 20 Дж



Оборотная сторона
образца после
удара 20 Дж

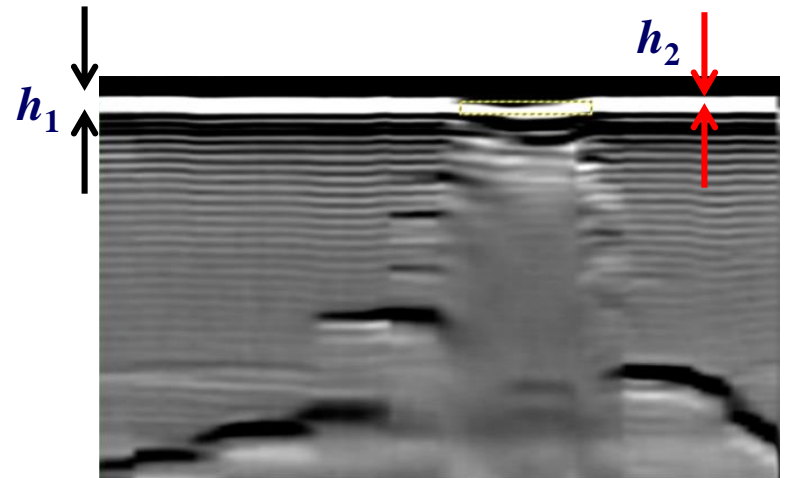


Исследование при помощи УИВ
углепластикового образца АП-05,
окрашенного штатным лакокрасочным
покрытием (ЛКП) на базе
*полиуретанового лака PPG Aerospace
CA40000 RAL 3000* (красный цвет)

1. Определение значений:

- толщины слоя нанесенного ЛКП
 $h_1 = 0,196$ мм;
- глубины вмятины малозаметного
ударного повреждения (МЗУП)
 $h_2 = 0,13$ мм;

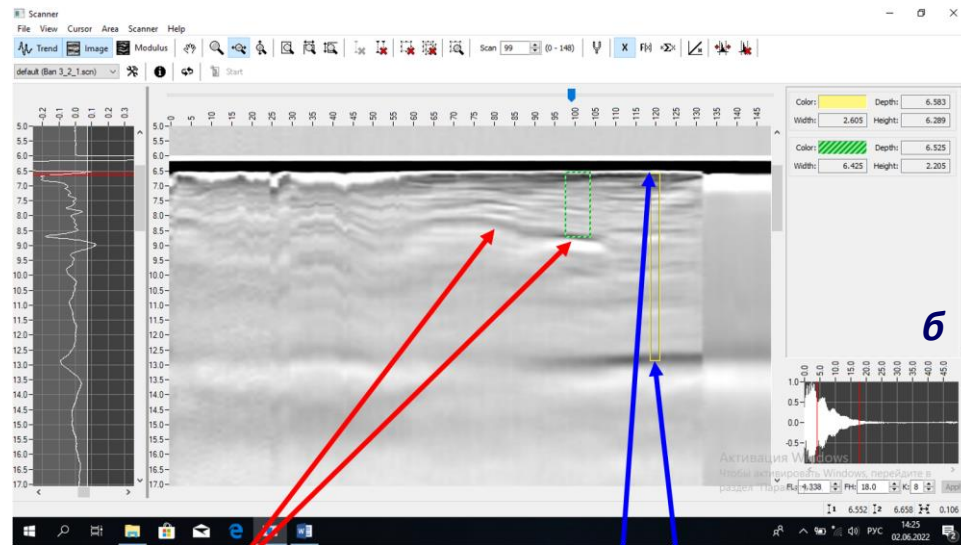
2. Регистрация качественной картины «пирамиды» ударного разрушения в образце АП-05



Применение действующего макета ЛУИВ при контроле металло-композитных валов двигателя



Визуализация расслоений внутри вала № 1 (а) и вала № 3 (б)



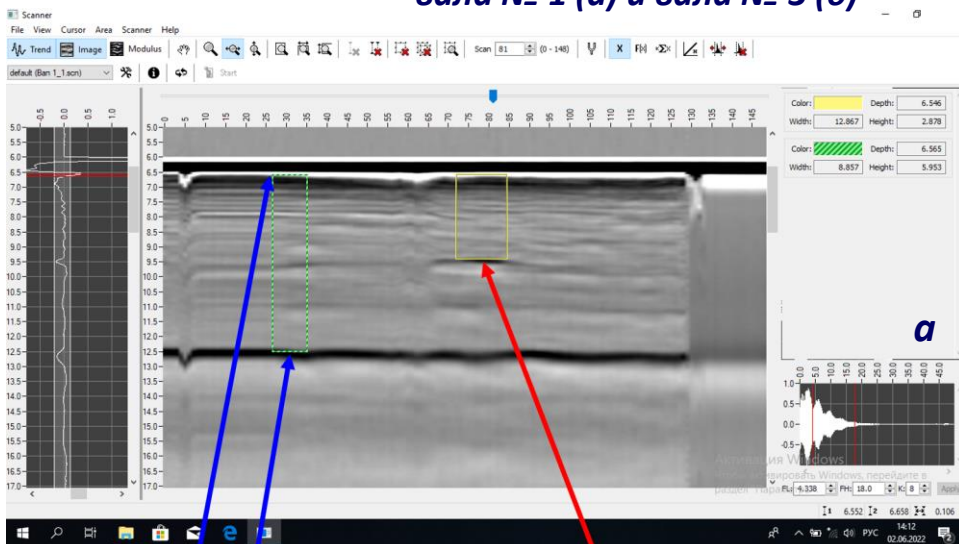
Несплошность (расслоение)

Верх и дно композитной части

► Изготовленные на одном предприятии и имеющие одинаковые металлические части валы двигателей имеют равные геометрические размеры внешних обводов:

- длина $L = 420$ мм,
 - внутренний диаметр $d = 19$ мм,
 - внешний диаметр регулярной части «композитного цилиндра» $D = 50$ мм;
- имеют различные типы плетения ровинга армирующего наполнителя.

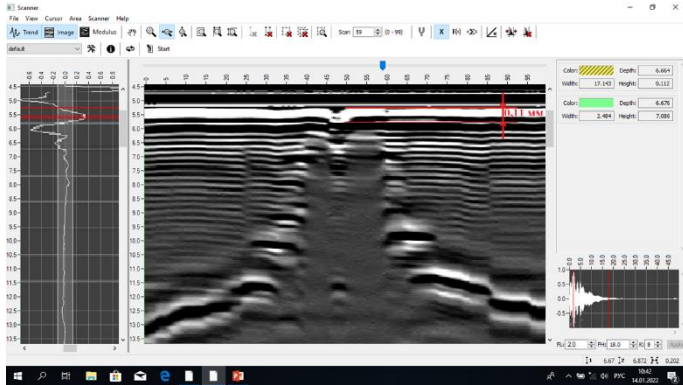
► Лазерно-ультразвуковой контроль выполнен для композитных частей валов № 1 и № 3



Верх и дно композитной части

Несплошность (расслоение)

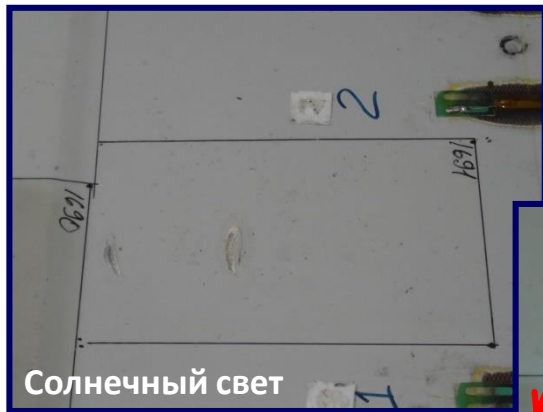
Комплексная процедура – разработка ФАУ «ЦАГИ» для мониторинга МЗУП композитных авиаконструкций



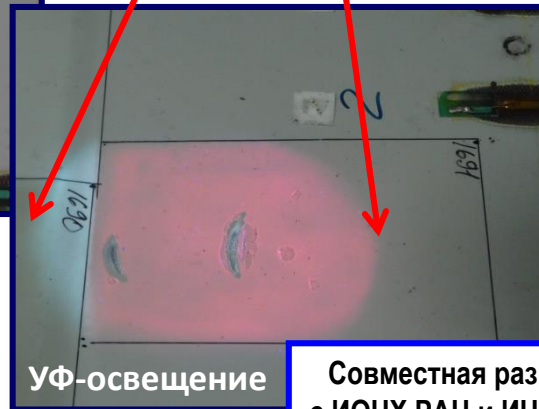
Визуализация «пирамиды» разрушений внутри ПКМ



2 Количественная и качественная оценка несплошностей ПКМ при помощи ЛУИВ



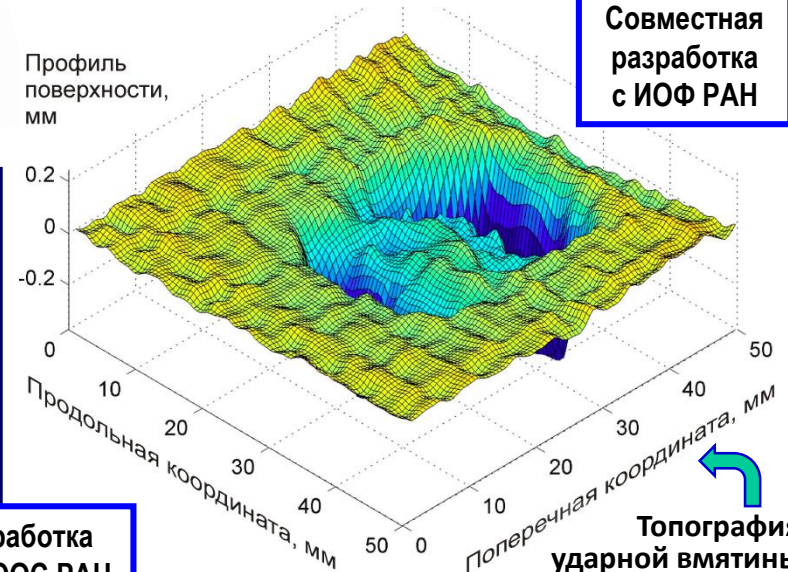
Солнечный свет



УФ-освещение

Совместная разработка с ИОНХ РАН и ИНЭОС РАН

Профиль поверхности, мм



Совместная разработка с ИОФ РАН

Топография ударной вмятины

1 Мало заметные ударные повреждения (МЗУП) оперативно регистрируются при визуальном осмотре с помощью ЛСП

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!