

## Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2026

### «Измерение адгезионной прочности волокно-матрица в ПКМ методом выталкивания моноволокна»

Гуляев А.И., Лосев А.В., Мовенко Д.А.

Докладчик:

**Гуляев**

Артем Игоревич



# Испытательный центр

Испытательный центр  
НИИ «Курчатовский  
институт» – ВИАМ  
включает в себя:

**>700** единиц испытательного  
оборудования

**>1000** видов исследований  
и испытаний

**>400** единиц исследовательского  
оборудования

Испытательный центр аккредитован Федеральным агентством воздушного транспорта (Росавиация) в качестве технически компетентного испытательного центра



Испытательный центр аккредитован в национальной системе аккредитации (Росаккредитация)

Испытательный центр аттестован филиалом ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России в качестве испытательного подразделения, соответствующего требованиям к технической компетентности и независимости, предъявляемым в руководящем документе РД В 319.02.70-08 «Аппаратура, приборы, устройства военного назначения. Требования к испытательным подразделениям и порядок их аттестации» (включая ГОСТ ISO/IEC 17025–2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий»)



Техническая компетенция Испытательного центра признана Российским морским регистром судоходства

## МЫ ПРЕДЛАГАЕМ:

- физико-механические испытания;
- исследования теплофизических свойств;
- исследование методами неразрушающего контроля;
- исследование на климатическую, микробиологическую стойкость и пожаробезопасность;
- металлофизические исследования;
- спектральные и химико-аналитические исследования;
- разработку и поставку стандартных образцов сплавов;
- испытания стандартных образцов с целью утверждения типа (ГСО);
- проведение межлабораторных сличительных испытаний.

# Лаборатория «Металлофизические исследования»

## Структура, компетенции, партнеры

### Сотрудничество с отраслями промышленности

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Авиа- и ракетостроение</li> <li>Двигателестроение</li> <li>Топливо-энергетический комплекс</li> <li>Металлургия</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Судостроение</li> <li>Машиностроение</li> <li>Строительство</li> <li>Нефтегазовая промышленность</li> </ul> |
|---|--|

### Компетенции

#### «Дифракционные методы исследования материалов»

*Просвечивающая электронная микроскопия,  
Рентгеноструктурный анализ*

- Контроль качества кристаллов и визуализация дефектов с субнанометровым разрешением
- Анализ механизмов пластической деформации
- Анализ нанопорошков и нанотрубок, керамик и композитов
- Анализ процессов и механизмов старения и термомеханического воздействия на атомарном уровне

#### «Исследование причин разрушения и фрактографический анализ»

*Растровая электронная микроскопия  
Наноиндентирование*

- Изучение механизмов разрушений при эксплуатации и в ходе испытаний
- Анализ коррозионных повреждений
- Установление причин разрушения образцов и ДСЕ

#### «Аналитическая микроскопия и металлография»

*Металлографический анализ  
Растровая электронная микроскопия  
Электронно-зондовый микроанализ*

- Определение количественных и качественных характеристик структуры материала
- Исследование состояния поверхности, построение 3D-моделей поверхности, определение шероховатости

Исследования в интересах предприятий



**РУСПОЛИМЕТ**



Исследование причин разрушений

Оптимизация технологических параметров

Контроль качества материалов

Подбор материалов-аналогов

Исследование коррозионных процессов

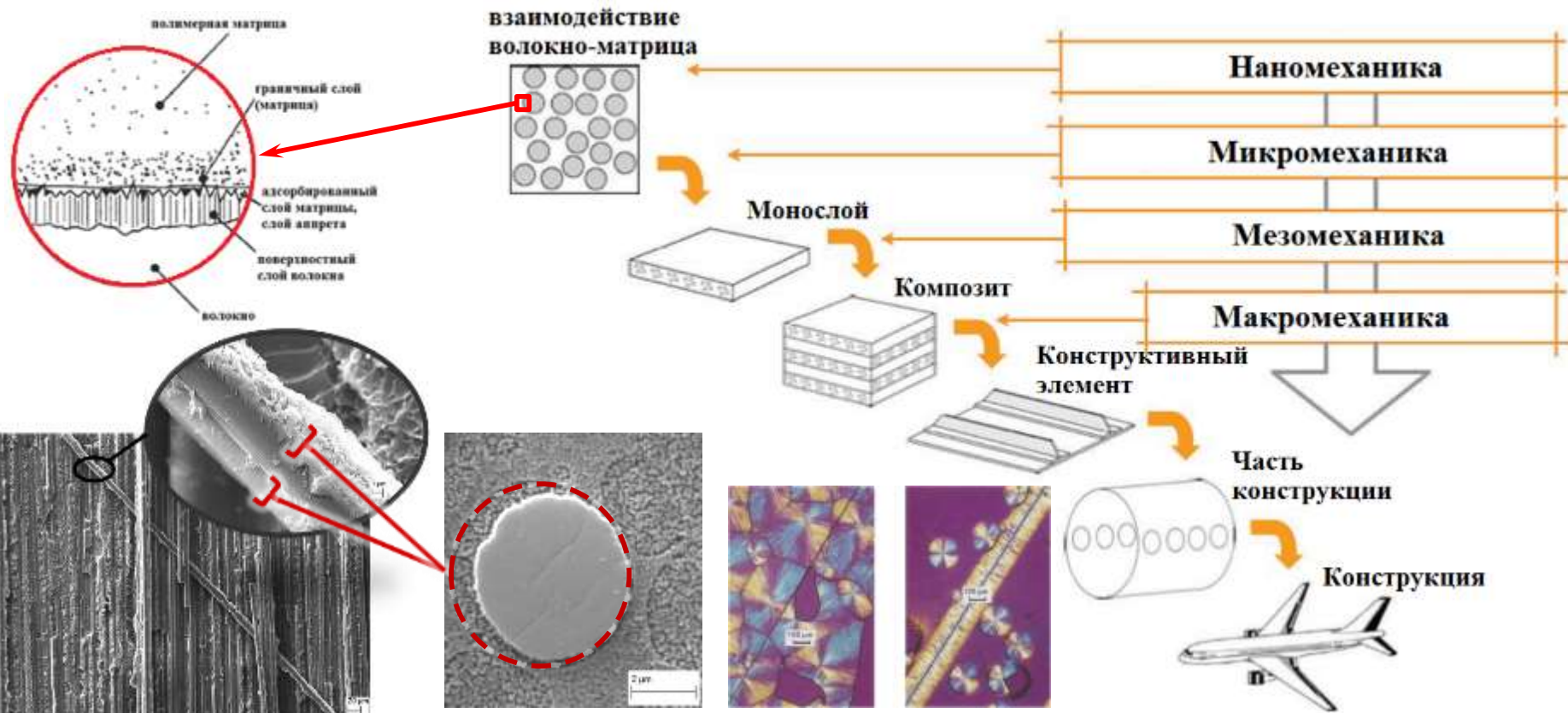
Корректировка режимов термической обработки



### Объекты исследований:

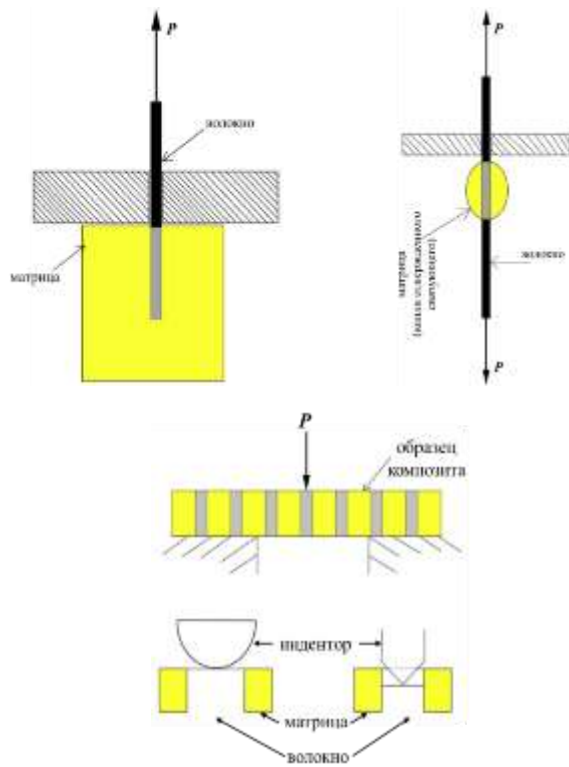
- Алюминиевые, титановые, никелевые и магниевые сплавы, стали
- Металлические композиционные материалы
- Полимерные композиционные материалы
- Керамики, углеродные материалы, теплоизоляционные материалы.

# Место адгезионной прочности в науке о ПКМ

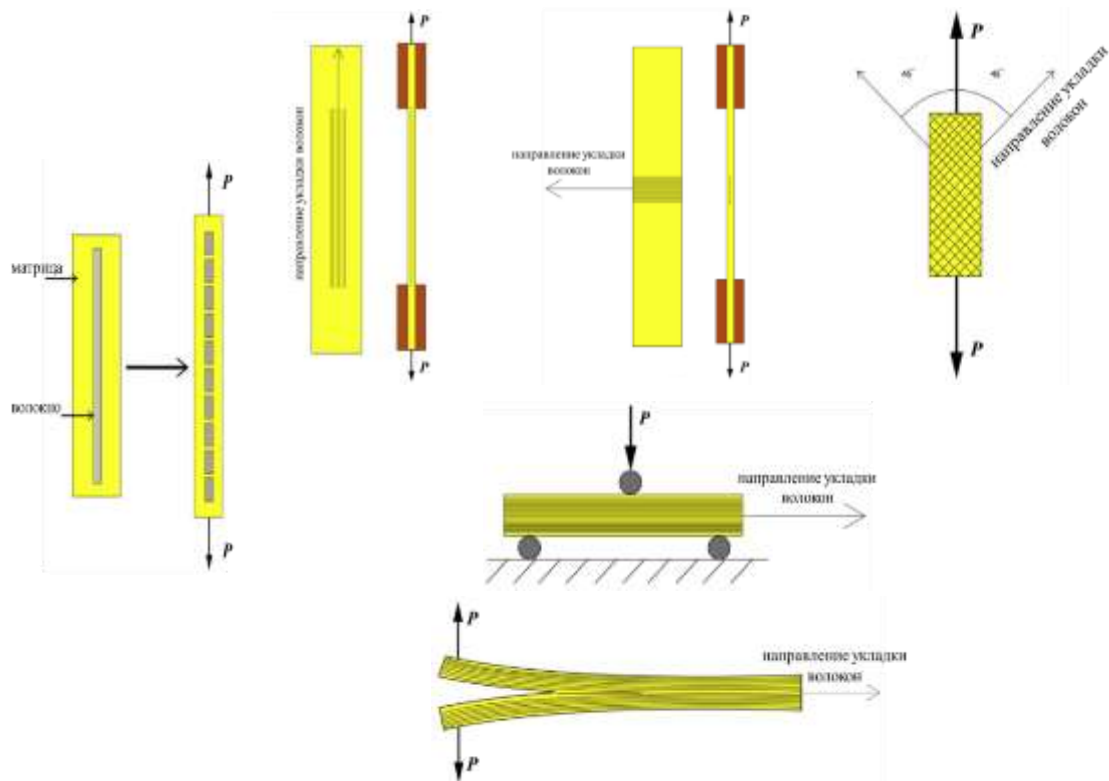


# Методы определения адгезионной прочности волокно-матрица

## Прямые методы

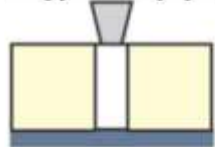


## Косвенные методы

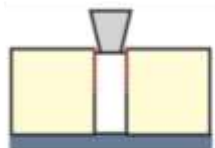


## Вдавливание

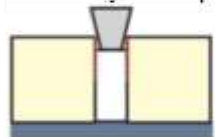
Упругая деформация



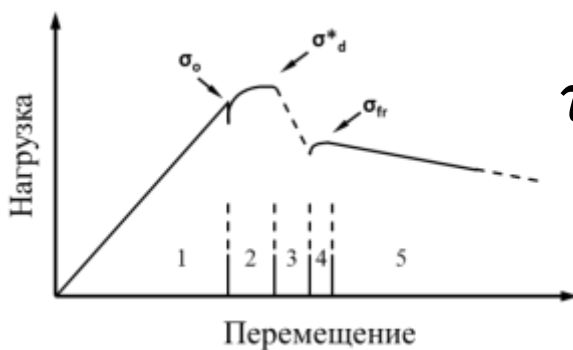
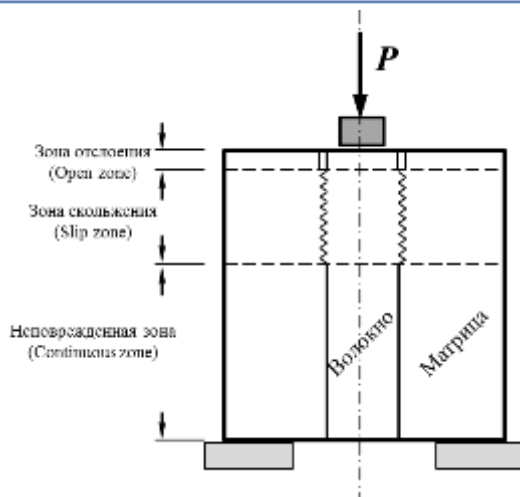
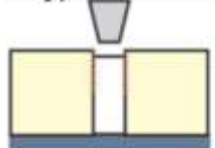
Начало отслоения



Максимум напряжения



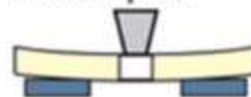
Упругое восстановление



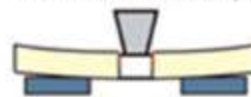
$$\tau = \frac{P}{\pi h}$$

## Выталкивание

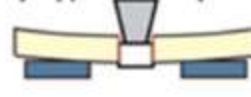
Изгиб образца



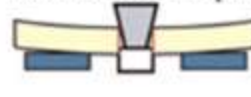
Упругая деформация граничного слоя  
Начало отслоения, максимум напряжения



Трение при скольжении по  
разрушенной границе раздела



Касания индентором матрицы



Упругое восстановление при разгрузке



# Схема пробоподготовки и проведения эксперимента

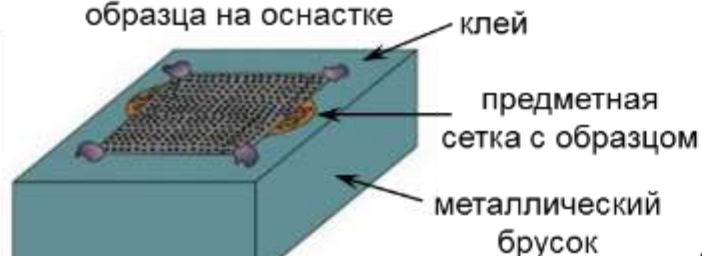
1. Вырезка образца из плиты ПКМ



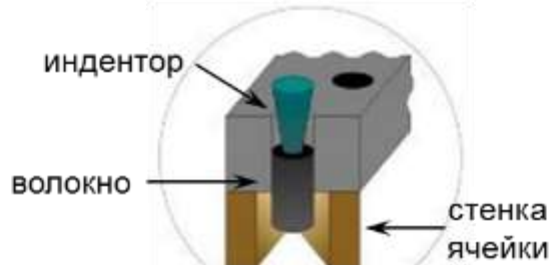
2. Механическое утонение образца перпендикулярно направлению армирования



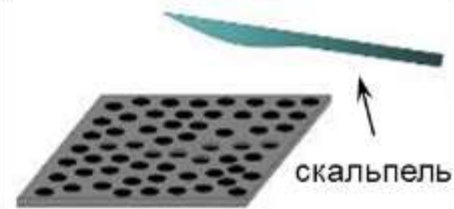
3. Закрепление образца на оснастке



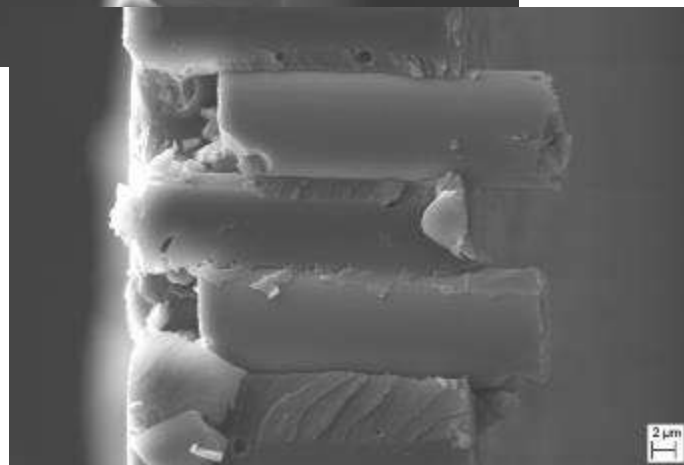
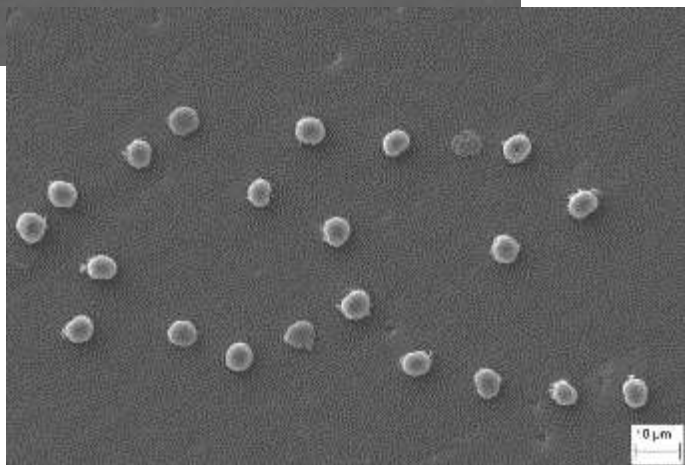
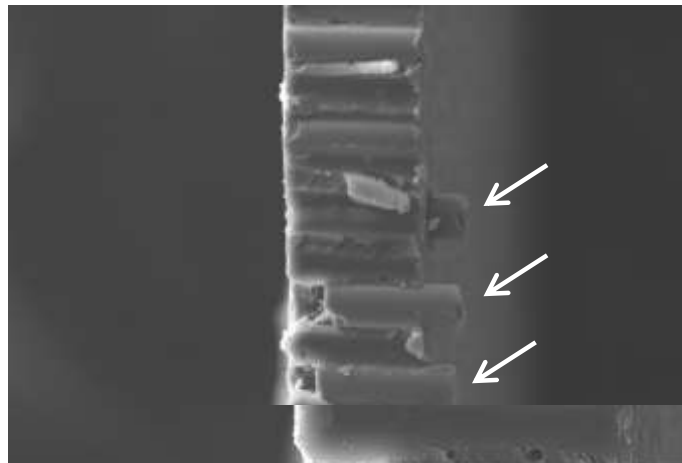
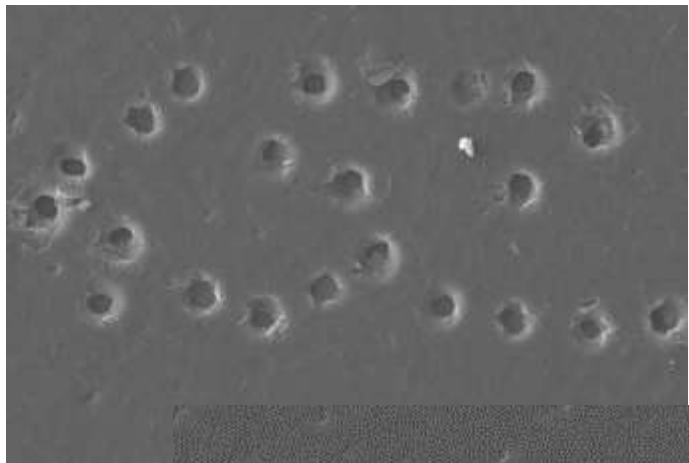
4. Выталкивание волокна индентором в ячейку предметной сетки



5. Изготовление среза для определения толщины образца в зоне индентирования

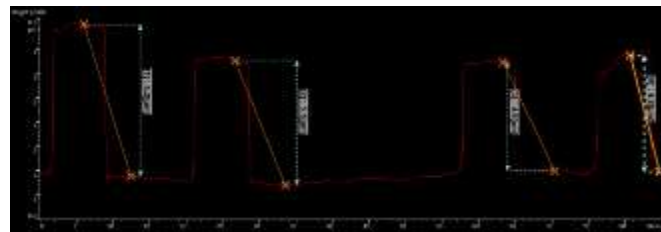
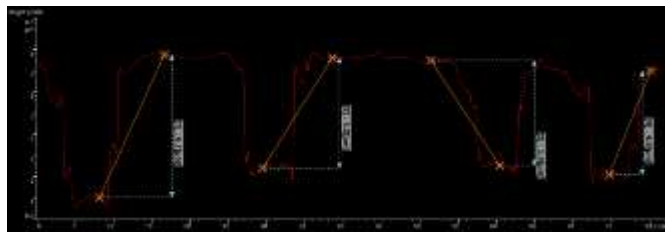
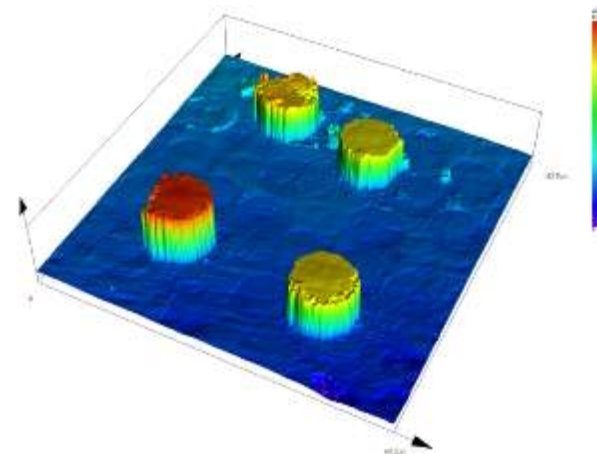
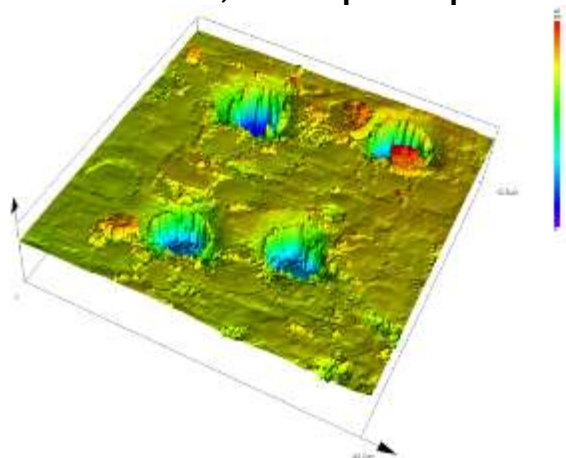


# Определение толщины образца



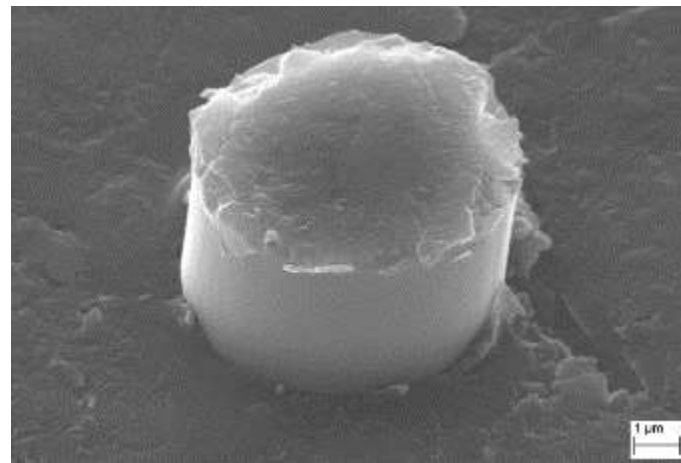
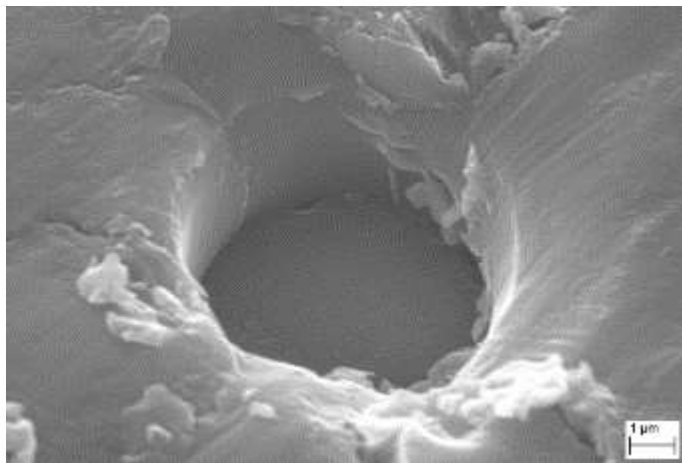
# Исследования процесса выталкивания волокна индентором методом КСЛМ

Соответствие значений перемещения волокна при выталкивании индентором, определяемое по вдавливанию его с рабочей стороны и выходу с противоположной, контролировали методом КСЛМ.



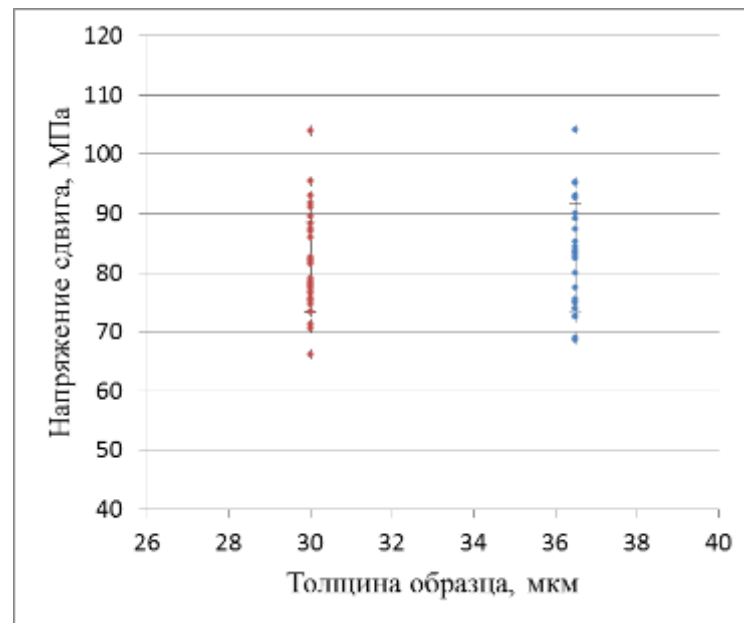
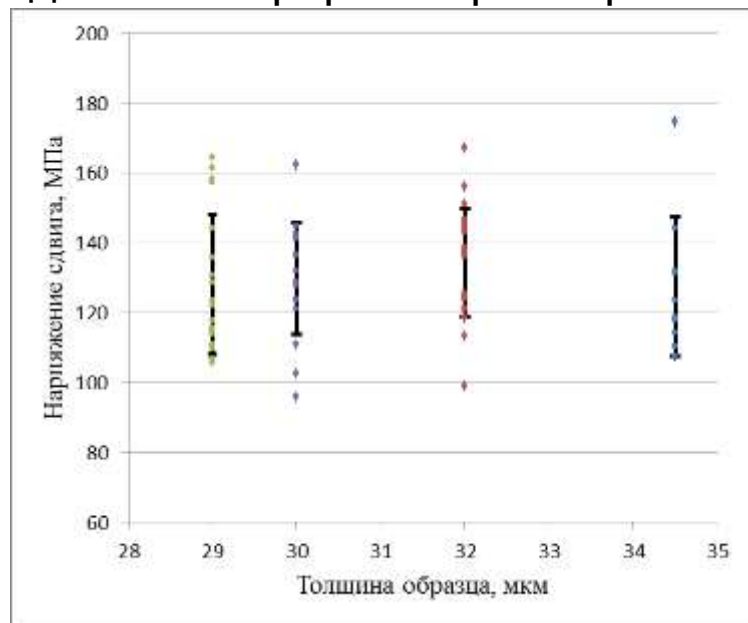
## Исследования процесса выталкивания волокна индентором методом РЭМ

При измерении адгезионной прочности корректные значения можно получить только при адгезионном характере разрушения. Характер разрушения и отсутствие признаков деформирования торцов волокон индентором контролировали методом РЭМ

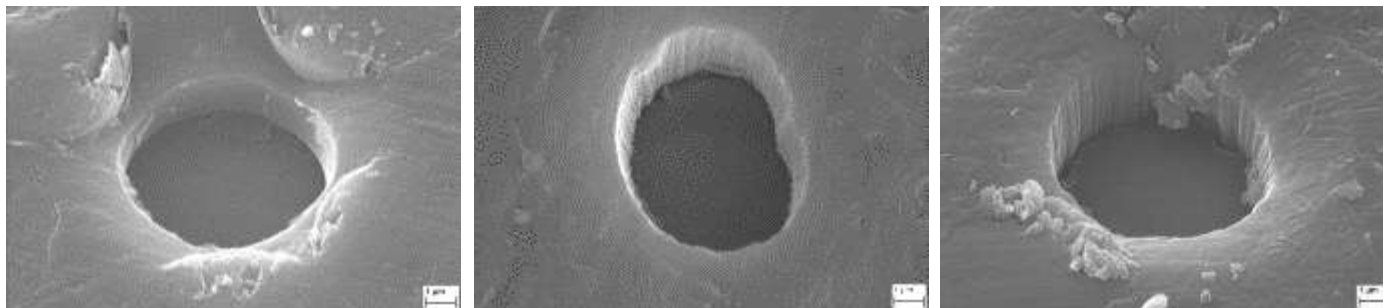


# Адгезионная прочность волокно-матрица при различной толщине образцов

Основной вопрос определения прочности адгезии волокна к матрице, состоит в том, характеризует ли выбранный метод адгезионную прочность системы волокно-полимер или регламентированного образца адгезионного соединения определенной формы и размеров.



# Результаты определения адгезионной прочности волокну-матрица



**YB №1**

**YB №2**

**YB №3**

**Матрица №1**

**114±13 (11,8%)**

**138±19 (14,0 %)**

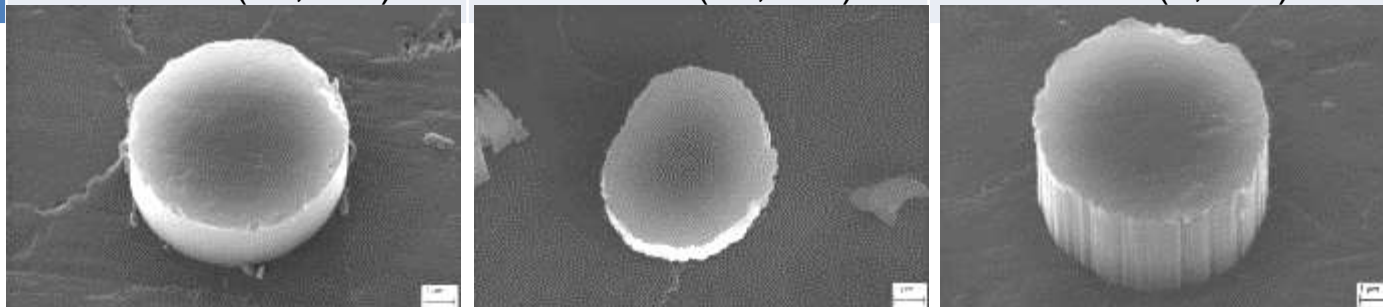
-

**Матрица №2**

**121±16 (13,1 %)**

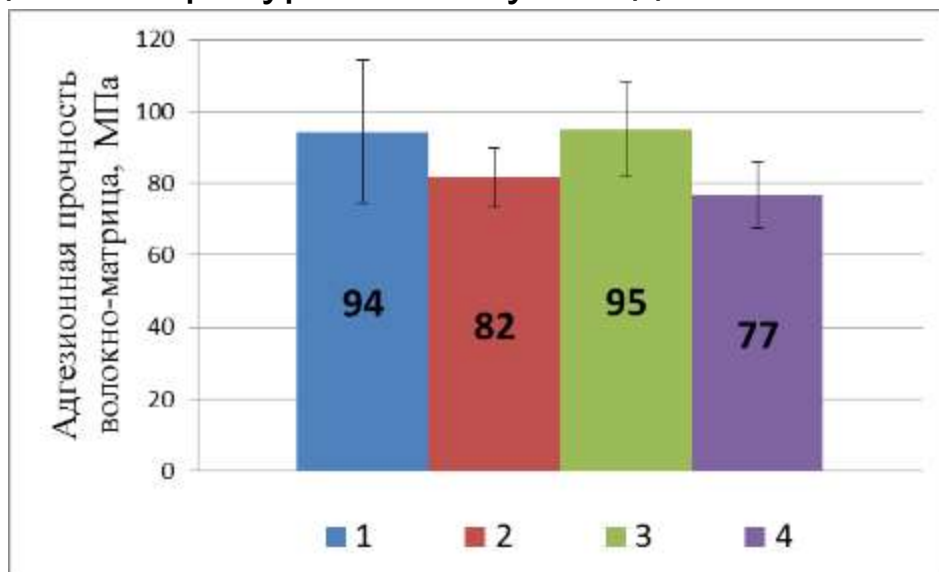
**131±17 (13,3 %)**

**115±9 (7,4 %)**



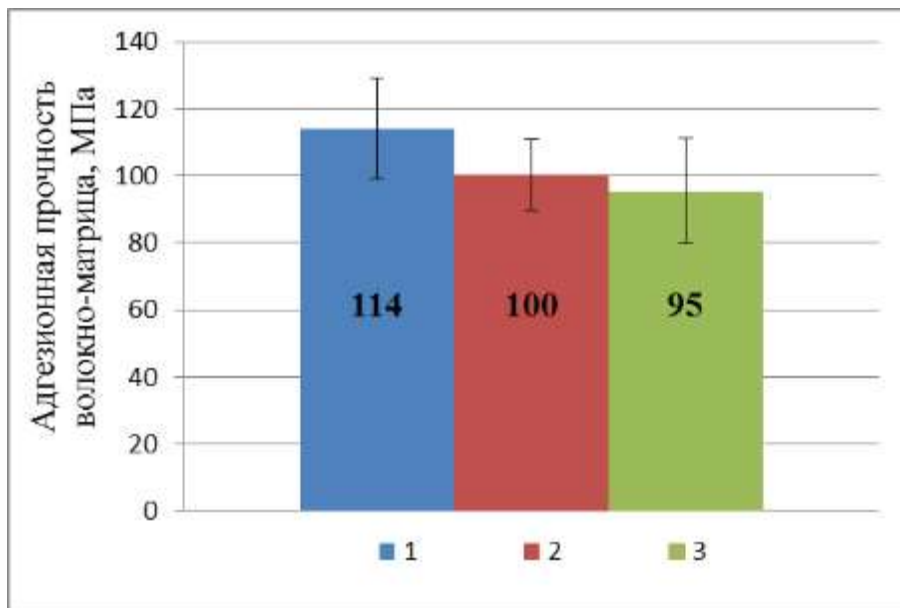
## Адгезионная прочность волокно-матрица для стеклопластика в различных состояниях

Образцы стеклопластика в исходном состоянии (1) были подвергнуты тепловлажностному старению до равновесного влагосодержания (2). Влагонасыщенные образцы были высушены до постоянной массы (3). Высушенные образцы были подвергнуты термоциклированию (4), включающему 200 циклов перепада температуры от минус 60 до 110 °С.



# Адгезионная прочность волокно-матрица для полиимидного углепластика в различных состояниях

Адгезионную прочность волокно-матрица в полиимидном углепластике исследовали для образцов в исходном состоянии (1), после термоциклирования, включающего 1000 циклов нагрева до 280 °С (2) и после термического старения при температуре 320 °С в течении 200 часов (3).



## Выводы

1. Необходимыми условиями получения **метрологически корректных** результатов являются измерение толщины образца в зоне индентирования, отсутствие признаков потери устойчивости волокна при сжатии, а также деформирования или разрушения торца нагружаемого волокна.
2. Показано, что напряжение сдвига по границе раздела волокно-матрица не зависит от толщины образца. Следовательно, в диапазоне параметров проведения эксперимента, в котором технически осуществимо определение адгезионной прочности волокно-матрица методом выталкивания моноволокна индентором, измеряемая величина может рассматриваться как **размерно-независимая**.
3. Показано, что адгезионная прочность в стеклопластике падает до 87% от начальной величины после тепловлажностного старения до равновесного содержания влаги (0,55 масс. %), а затем полностью восстанавливается при высушивании образцов. Сохраняемость адгезионной прочности волокно-матрица после тепловлажностного старения и последующего термоциклирования составила 82 %.
4. Показано, что адгезионная прочность в полиимидном углепластике падает на 12% после термоциклирования. Сохраняемость адгезионной прочности волокно-матрица после термического старения при 320 °С в течение 200 часов составила 83 %.

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

