

УДК 678

**Оценка шероховатости поверхностей углеродных волокон с помощью атомно–силового микроскопа**

Нелюб В.А., Александров И.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: mail@emtc.ru

*Изложена методика определения шероховатости поверхностей волокнистых наполнителей и приведены результаты оценки величины  $R_a$  для некоторых марок, наиболее распространенных в России углеродных волокон. Приведены фото микроструктур поверхностных слоев углеродных волокон.*

***Ключевые слова:** углеродные волокна, параметры шероховатости, атомно-силовая микроскопия.*

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), и в первую очередь стеклопластики и углепластики, нашли широкое применение в авиакосмическом производстве, строительстве, ветроэнергетики и др. отраслях народного хозяйства при изготовлении различных силовых элементов, термостойких панелей, уплотнителей и многих других деталей, от которых требуется сочетание высокой прочности, легкости, термостойкости и долговечности [1].

Механические свойства углепластиков во многом зависят не только от физико-механических свойств применяемых волокнистых наполнителей, но и от топологии их поверхностей. В настоящее время накоплен большой объем информации о свойствах углепластиков на основе различных углеродных волокон (УВ), их поведении при различных типах нагружения и надежности при воздействии различных эксплуатационных факторов [2]. Однако в литературе очень ограниченно приводятся данные о структурах УВ и качестве поверхностных слоев единичных монофиламентов УВ [3, 4].

Целью настоящей работы является разработка методики определения параметров шероховатости волокнистых наполнителей.

Под шероховатостью понимается совокупность неровностей, выделенных с помощью кадра на микроскопах. Параметры шероховатости для металлов определяются по ГОСТ 2789–73, который выделяет шесть показателей: среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  (мкм); высоту неровностей профиля  $R_z$  (мкм), наибольшая высота профиля  $R_{max}$  (мкм), средний шаг профиля (мм), средний шаг местных выступов профиля (мм) и относительная опорная длина профиля (%). Для оценки шероховатости поверхностей с регулярным рельефом также может быть использован ГОСТ 24773–81, в котором изложена методика определения профильных показателей шероховатости.

Для некоторых материалов, например, древесины, также существует нормативная документация, в которой регламентируются параметры шероховатости. В соответствии с ГОСТ 15612–85 для древесины установлены четыре параметра шероховатости: среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  (мкм); высоту неровностей профиля  $R_z$  (мкм), наибольшая высота профиля  $R_{max}$  (мкм) и средний шаг профиля (мм).

В то же время, для волокнистых материалов нет единых нормативных документов, в соответствии с которыми можно было бы определить параметры шероховатости. В настоящей работе измерение эффективной высоты шероховатости проводилась с помощью атомно-силового микроскопа с наноиндентером Solver NexT, NT-MDT. Отличительной особенностью микроскопов данного типа является не только визуализация исследуемой поверхности с высокой точностью и хорошим качеством, но и обработка полученных результатов, которая позволяет получать целый ряд характеристик шероховатости и проводить их статистический анализ. Данный тип микроскопов позволяет исследовать поверхностные слои любых твердых тел в диапазоне от  $10^{-9}$  до  $10^{-5}$  м.

Принцип работы микроскопа основан на исследовании микрорельефа поверхности с помощью специального зонда, который представляют собой иглу, острие которой имеет размеры порядка 10 нм. Взаимодействие зонда с поверхностью характеризуется некоторым параметром  $P$ , который зависит от расстояния между зондом и исследуемой поверхностью.

Схема работы микроскопов такого типа показана на рис. 1. Система обратной связи поддерживает значение параметра  $P$  постоянным, равным величине  $P_0$ , задаваемой оператором. Если расстояние зонд – поверхность изменяется (например, увеличивается), то происходит изменение (увеличение) параметра  $P$ . В системе ОС формируется разностный сигнал, пропорциональный величине  $P = P - P_0$ , который усиливается до нужной величины и подается на исполнительный элемент [5], который отработывает полученный сигнал, приближая зонд к поверхности или отодвигая его до тех пор, пока разностный сигнал не станет равным нулю. Таким образом можно поддерживать расстояние зонд-образец с высокой точностью до  $0.01 \text{ \AA}$  [5].

При перемещении зонда вдоль поверхности образца происходит изменение параметра взаимодействия  $P$ , обусловленное рельефом поверхности. При сканировании зонд вначале движется над образцом вдоль определенной линии (строчная развертка), при этом величина сигнала на исполнительном элементе, пропорциональная рельефу поверхности, записывается в память компьютера. Затем зонд возвращается в исходную точку и переходит на следующую строку сканирования (кадровая развертка), и процесс повторяется вновь. Записанный таким образом при сканировании сигнал обратной связи обрабатывается компьютером, и строится профилограмма исследуемой поверхности (рис. 2).

В качестве объекта исследования в настоящей работе были использованы четыре типа волокон: УКН-2500, УКН-М-6К. Tenax HTA40 E13 3K и Granoc XN-90-60S (табл. 1).

Как видно из полученных результатов структурных исследований (табл. 2) значения шероховатости по  $R_z$  исследованных типов УВ отличаются между собой незначительно, тогда как параметры шероховатости по  $R_a$  у отечественных и импортных волокон отличаются очень существенно (для волокна марки УКН-2500 на порядок). Практически также сильно отличаются значения дисперсии. Все эти показатели позволяют оценить качество волокнистого наполнителя.

## 1. Физико-механические свойства углеродных волокон

Показатели	Марки УВ			
	УКН-2500	УКН-М-6К	Tenax HTA40 E13 3K	Granoc XN-90- 60S
Номинальная линейная плотность, текс	205	380	200	880
Удельное сопротивление, Ом·см	250±1	66±0,1	1,6x10 <sup>-3</sup>	–
Отклонение фактической линейной плотности от номинальной, %	±7	±8	-	–
Плотность (объёмная масса), г/см <sup>3</sup>	1,73±0,03	1,75±0,04	1,76	2,19
Удельная разрывная нагрузка нити при разрыве петель, сН/текс	6	10	-	-
Массовая доля аппрета, %	3,5±1,5	1±0,5	-	
Модуль упругости нити, ГПа	220±20	225±20	238	860
Разрушающее напряжение элементарной нити при растяжении, ГПа, не менее	2,5	3,5	3,95	3,43
Разрушающее напряжение нити при растяжении, комплексной в микропластике, ГПа	2,8	3,2	-	-
Разрушающее напряжение углепластика при растяжении, ГПа, не менее	1,5	1,65	-	-
Разрушающее напряжение углепластика при сжатии, ГПа, не менее	1,2	1,2	-	-

Проведенный структурный анализ позволил определить значение параметров шероховатости УВ, которые будут использованы при выборе матрицы с требуемыми реологическими характеристиками. Дело в том, что топология УВ, стабильность ее свойств имеет очень большое значение, поскольку именно от качества поверхности волокна (точнее, монофиламентов) зависит качество межфазного взаимодействия на границе волокно-матрица. Главная функция поверхности раздела обеспечить передачу нагрузки между волокном и полимерной матрицей и чем меньше шероховатость поверхностей монофиламентов, чем ниже дисперсия, тем выше межфазное взаимодействие и, соот-

ветственно, выше все эксплуатационные характеристики получаемых изделий из углепластиков.

## 2. Результаты измерений шероховатости поверхностей УВ

Показатели	Марки УВ			
	УКН <sup>®</sup> -2500	УКН <sup>®</sup> -М-6К	Tenax <sup>®</sup> НТА40 E13 3К	Granoc <sup>®</sup> XN-90-60S
Количество точек выборки	268	236	235	277
Наибольшая высота профиля, нм	3919,19	4073,12	3728,83	9630,24
Наименьшая высота профиля, нм	3396,25	3780,42	3634,13	9497,66
Средний шаг местных выступов профиля, $R_y$ , нм	522,939	292,695	94,6987	87,606
Высота неровностей профиля по десяти точкам, $R_z$ , нм	3655,63	3923,89	3680,7	9566,17
Уровень средней линии, нм	3685,3	3907,67	3697,76	9547,16
Среднеарифметическое отклонение профиля, $R_a$ , нм	121,225	60,746	22,5977	15,5024
Среднеквадратическое отклонение профиля, $R_q$	3687	3908,32	3697,8	9547,18
Дисперсия, нм	140,424	71,2973	17,0151	19,4449

*Отдельные результаты настоящей работы получены при финансовой поддержке по ГК 11.519.11.3029*

### Список литературы

1. Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники / Сб. 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ». 2007. С.20-26.

2. Баженов С.Л., Берлин А.А., Кульков А.А., Ошмян В.Г. Полимерные композиционные материалы. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. 352 с.

3. Александров И.А., Малышева Г.В., Нелюб В.А. и др. Исследование поверхностей разрушения углепластиков, изготовленных по расплавной и рас-  
«Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам». 4. 2013. Нелюб

творной технологиям // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 3. С. 7-12.

4. Александров И.А., Муранов А.Н., Малышева Г.В. Изучение влияния деформационных свойств связующих на процессы разрушения углепластиков // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 7. С. 40-45.

5. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: учебное пособие для студентов старших курсов ВУЗов. Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004. 116с.

Подрисуночные подписи к статье Нелюба Оценка шероховатости поверхностей углеродных волокон с помощью атомно–силового микроскопа

**Рис. 1. Схема перемещения зонда по исследуемой поверхности**

**Рис. 2. Профиллограмма шероховатости поверхности углеродного волокна марки УКН-5000**

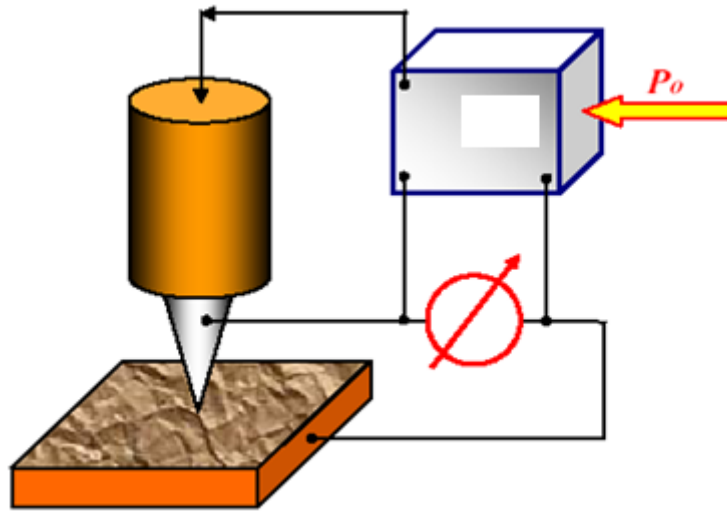


Рис. 1.



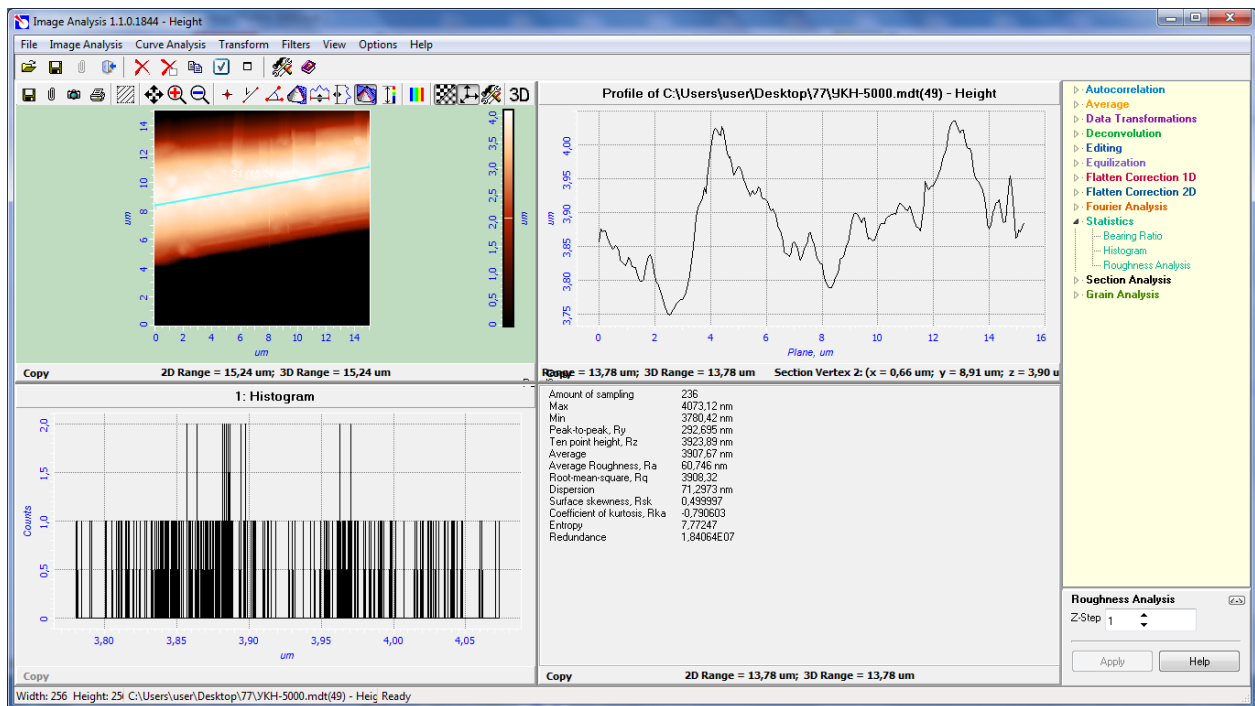


Рис. 2.