



DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2022.4.6>

УДК 543.57-033.5

ББК 24.534.125

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ СТЕКЛА МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЙ МИКРОСКОПИИ

**Татьяна Викторовна Кислова**

Старший преподаватель, кафедра судебной экспертизы и физического материаловедения,  
Волгоградский государственный университет  
kislova.tatyana@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Владимир Витальевич Акатьев**

Старший преподаватель, кафедра судебной экспертизы и физического материаловедения,  
Волгоградский государственный университет  
akatiev@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Константин Олегович Смирнов**

Старший преподаватель, кафедра судебной экспертизы и физического материаловедения,  
Волгоградский государственный университет  
smirnov@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Илья Михайлович Укустов**

Специалист дистанционного сопровождения деятельности судебных приставов,  
НАО «Первое клиентское бюро»  
ilya-ukustov@mail.ru  
ул. им. Рокоссовского, 62, 400050 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** Представлены результаты исследования микрорельефа поверхности стекла, подвергнутого термообработке при различных температурах и временах нагрева методом атомно-силовой микроскопии. По результатам сканирования рельефа образцов построены гистограммы значений элементов изображения (высот рельефа) и вычислены значения средней арифметической и средней квадратической шероховатостей поверхности стекла до и после термообработки. Установлено, что в процессе термообработки шероховатость поверхности стекла уменьшается.

**Ключевые слова:** атомно-силовая микроскопия, параметры шероховатости, стекло, термообработка, пожарно-техническая экспертиза.

При определении местоположения очага пожара и установления локальных температур в зоне пожара внутри здания часто объектами экспертного исследования являются оконные стекла. По своей природе стекла обладают различными физико-химическими свойствами (оптические характеристики, твердость и др.), различным внутренним (структурой, дефектами, включениями) и внешним (качество поверхности, наличие покрытий) строением. В условиях пожара, под термическим и механическим воздействием, эти свойства могут изменяться. Поэтому они могут быть использованы экспертом при исследовании объектов с пожара для решения поставленных перед ним вопросов [4; 8].

Для исследования поверхностей твердых тел широко применяют методы, позволяющие получать изображения поверхности с атомарным разрешением. Одним из таких методов может стать использование сканирующей атомно-силовой микроскопии для исследования микрорельефа стекла, подвергшегося высокотемпературному воздействию, в ходе которого он может изменяться [5].

Сканирующая атомно-силовая микроскопия позволяет не только визуализировать поверхность объектов из стекла с высокой разрешающей способностью, но и обрабатывать полученные данные и проводить их статистический анализ, результатом которого является ряд характеристик рельефа поверхности. Наиболее распространенными из них являются: средняя арифметическая шероховатость  $R_a$  и средняя квадратическая шероховатость  $R_{rms}$  [1; 6].

В работе [3] сообщается, что каждой температуре нагрева соответствуют свои показатели высоты пиков рельефа, и с повышением температуры прослеживается уменьшение пиков рельефа поверхности стекла. Но в данной работе отсутствуют сведения о влиянии продолжительности термического воздействия на микрорельеф.

Поэтому целью настоящей работы является установление зависимости изменения шероховатости поверхности оконного стекла от температуры и времени ее воздействия.

## Методика эксперимента

В качестве объектов исследования в настоящей работе были использованы три фрагмента оконного листового стекла размером  $10 \times 10$  мм и толщиной 3 мм, вырезанные с помощью стеклореза из единого массива [2]. Размер образцов обусловлен условиями работы, используемого для исследований сканирующего зондового микроскопа «NanoEducator» в конфигурации ССМ (сканирующий силовой микроскоп) с применением прерывисто-контактного («полуконтактного») метода с отображением рельефа поверхности образца [5]. Радиус зонда для сканирования поверхности составлял 70 нм. Площадь сканирования выбрана размером  $15000 \times 15000$  нм; количество точек измерений по осям  $X$  и  $Y$  равнялось 100. Сканирующий зондовый микроскоп укомплектован программным обеспечением для проведения исследований параметров шероховатости, с помощью которого вычисляются основные статистические параметры для исходного объекта, и строится гистограмма плотности распределения значений функции для всего изображения [7].

Объекты исследования подвергались высокотемпературному воздействию в муфельной печи при температурах 300, 400 и 500 °С, при последовательном увеличении времени выдержки.

Каждый из трех стеклянных образцов, поверхность которых предварительно сканировалась, помещался в муфельную печь, разогретую предварительно до соответствующей температуры с выдержкой 30 мин от момента загрузки до выгрузки из печи. После остывания на открытом воздухе поверхность его сканировалась и образец вновь помещался в муфельную печь, где выдерживался еще 60 минут. После остывания и процедуры сканирования поверхности образец еще раз помещался и выдерживался в печи дополнительно 120 мин и тоже сканировался.

По результатам сканирования рельефа образцов построены гистограммы значений элементов изображения (высот рельефа) и вычислены значения средней арифметической и средней квадратической шероховатостей поверхности (см. рис. 1).

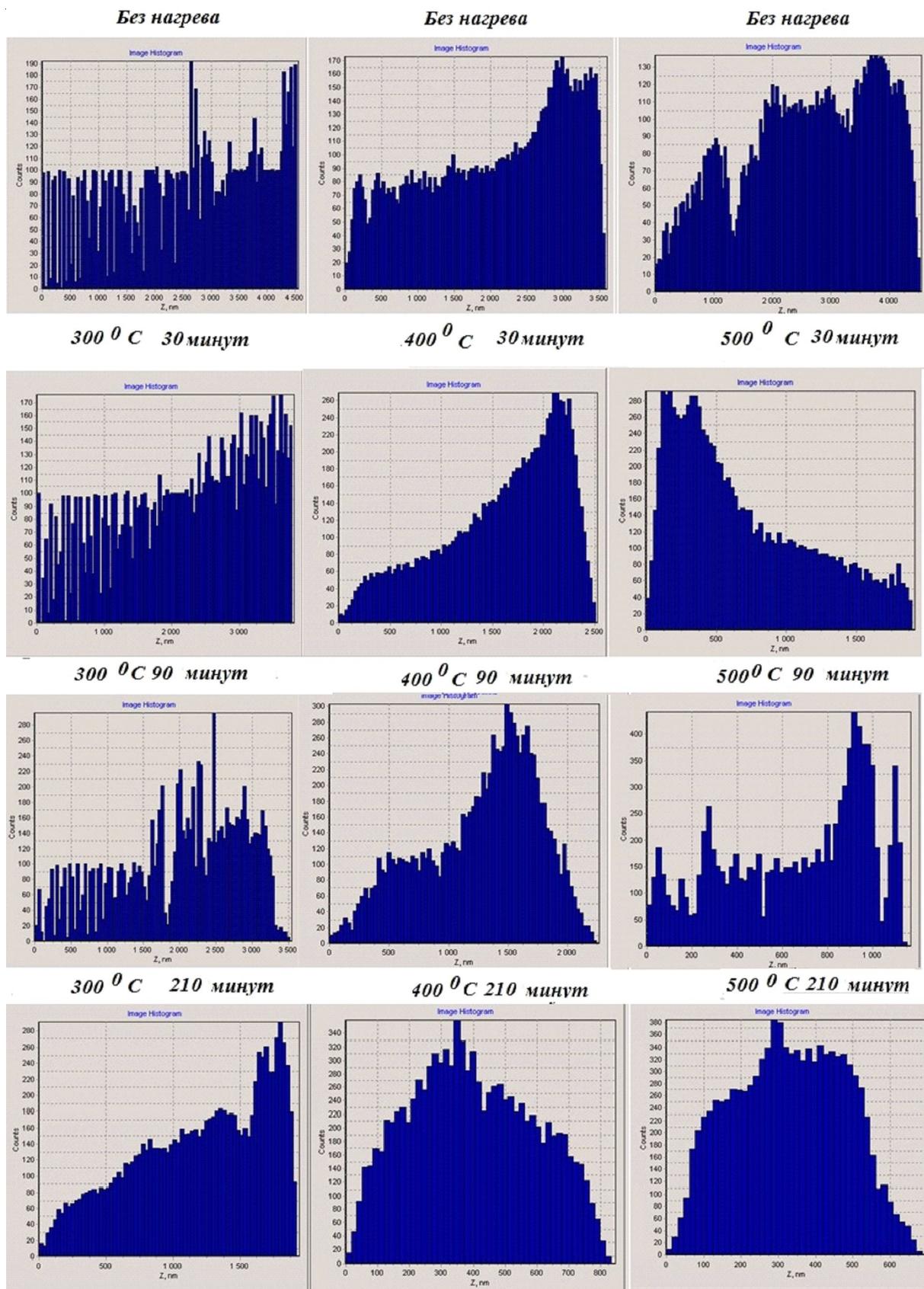


Рис. 1. Гистограммы распределения высот рельефа образцов до и после высокотемпературной обработки

При построении гистограмм изображения по оси абсцисс откладываются значения высот неровностей в точках изображения; по оси ординат – значения количества точек, имеющих данное значение высот. За нулевой уровень при вычислении принимается средняя высота рельефа  $z$ . Результаты измерений показателей шероховатости представлены в таблице.

### Обсуждение результатов

При анализе гистограмм поверхностей образцов можно сделать предварительные выводы:

– максимальные значения высот неровностей образцов по мере увеличения продолжительности термического воздействия при постоянной температуре уменьшаются;

– при увеличении температуры термического воздействия указанные выше характеристики шероховатости уменьшаются в большей степени;

– вместе с тем, с увеличением продолжительности и температуры термического воздействия увеличивается доля максимумов высот шероховатости, имеющих меньшие значения.

На основании вышеизложенного можно сделать общее заключение, что ужесточение условий термического воздействия ведет к сглаживанию поверхностей стеклянных образцов.

Более точные, количественные результаты измерения шероховатости поверхностей представлены в таблице и на рисунках 2, 3.

Анализ графических зависимостей количественных характеристик шероховатости

### Результаты измерений шероховатости поверхностей исследуемых образцов

Температура нагрева, °С	Время выдержки при данной температуре, мин	Средняя арифметическая шероховатость, нм	Средняя квадратическая шероховатость, нм
Без нагрева	–	1091	1280
300	30	889	1040
	60	719	861
	120	421	495
Без нагрева	–	874	1007
400	30	502	602
	60	402	485
	120	164	195
Без нагрева	–	988	1163
500	30	416	493
	60	277	318
	120	125	148

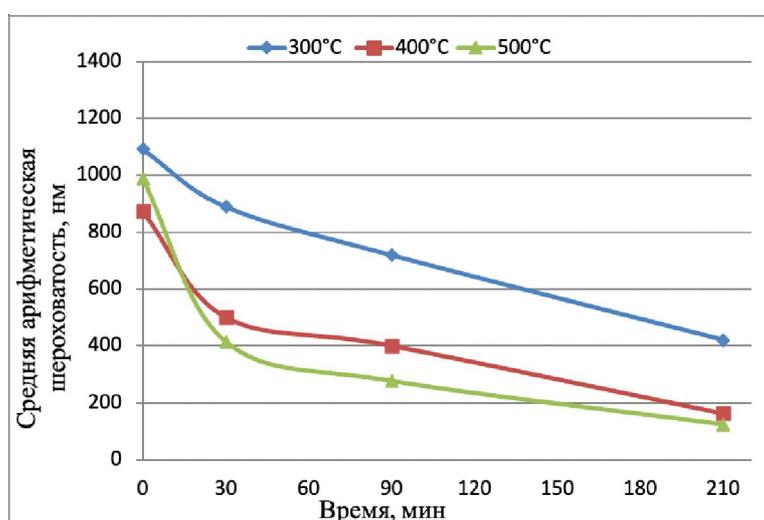


Рис. 2. Зависимость средней арифметической шероховатости поверхности стекла от времени выдержки в условиях постоянства температур

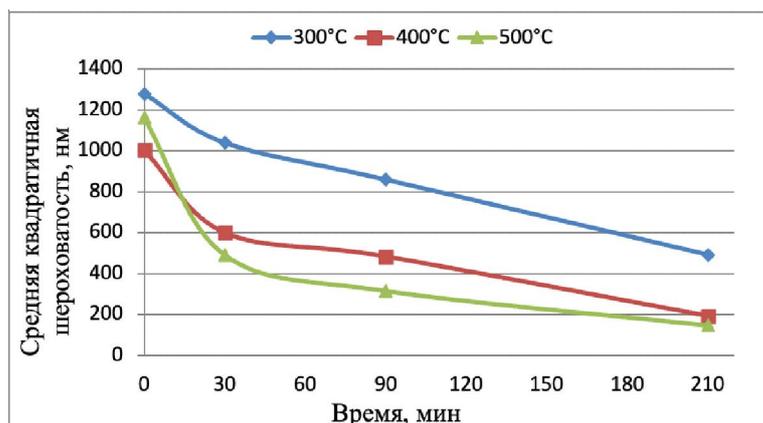


Рис. 3. Зависимость средней квадратической шероховатости поверхности стекла от времени выдержки в условиях постоянства температур

показывает, что наиболее интенсивно процесс сглаживания идет в первоначальный период (первые 30 мин), интенсивность этого процесса усиливается с увеличением температуры термического воздействия. В дальнейшем процесс сглаживания поверхностей принимает более спокойный, практически линейный характер (рис. 2, 3).

### Заключение

Дальнейшее развитие исследований методом атомно-силовой микроскопии фрагментов оконных стекол, побывавших в зоне пожара, может дать возможность установить температуру, которой были подвергнуты стеклянные фрагменты. Расположение таких фрагментов в зоне завершённого пожара может позволить указать направление к месту наиболее горячей зоны горения в соответствии с уменьшением значений шероховатости осколков оконных стекол, побывавших в зоне горения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 25142-82 (СТ СЭВ 1156-78) Шероховатость поверхности. Термины и определения (с изм. № 1) // Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации – docs.cntd.ru : [сайт]. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200008348> (дата обращения: 28.11.2022). – Загл. с экрана.
- ГОСТ Р 54170-2010 Стеклолистное бесцветное. Технические условия // Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации – docs.cntd.ru : [сайт]. – Электрон. текстовые

дан. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200083310> (дата обращения: 28.11.2022). – Загл. с экрана.

- Исследование поверхностной текстуры стекол, подвергшихся термическому воздействию, методом сканирующей зондовой микроскопии / Г. К. Ивахнюк, И. Д. Чешко, А. В. Иванов, Н. А. Южакова // Химия поверхности и нанотехнология : Пятая Всерос. конф. (с междунар. участием). – СПб. : Изд-во СПбГТИ (ТУ), 2012. – 316 с.

- Медведева, Л. В. Установление причины пожара с использованием сканирующей зондовой микроскопии / Л. В. Медведева, Н. А. Южакова // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2013. – № 1 (5). – С. 42–45.

- Миронов, В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии : учеб. пособие для студентов старших курсов вузов / В. Л. Миронов. – М. : Техносфера, 2009. – 143 с.

- Морозов, И. А. Современные проблемы механики. Теория и практика атомно-силовой микроскопии / И. А. Морозов. – Пермь : Изд-во ПГНИУ, 2020. – 108 с.

- Программа управления СЗМ NOVA. Справочное руководство. – М. : ЗАО «Нанотехнология-МДТ», 2008. – 266 с.

- Расследование пожаров : учебник / М. А. Галишев, С. В. Шарапов, А. В. Попов [и др.]. – СПб. : Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, 2013. – 192 с.

### REFERENCES

- GOST 25142-82 (ST SJeV 1156-78) Surface roughness. Terms and definitions (s izm. № 1) [GOST 25142-82 (ST SEV 1156-78) Surface

Roughness. Terms and Definitions (With Amendment No. 1)]. *Elektronnyy fond pravovoy i normativno-tekhnicheskoy informatsii – docs.cntd.ru: [sayt]*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200008348> (accessed 28 November 2022).

2. GOST R 54170-2010 Steklo listovoe besцветnoe. Tehnicheskie uslovija [GOST R 54170-2010 Sheet Glass is Colorless. Technical Specifications]. *Elektronnyy fond pravovoy i normativno-tekhnicheskoy informatsii – docs.cntd.ru: [sayt]*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200083310> (accessed 28 November 2022).

3. Ivakhnyuk G.K. et al., eds. Issledovanie poverhnostnoj tekstury stekol, podvergshisja termicheskomu vozdejstviyu, metodom skanirujushhej zondovoj mikroskopii [Examination of the Surface Texture of Thermally Exposed Glasses by Scanning Probe Microscopy]. *Himija poverhnosti i nanotehnologija: Pjataja Vseros. konf. (s mezhdunar. uchastiem)* [Fifth All-Russian Conference (With International Participation) “Surface Chemistry and Nanotechnology”]. Saint Petersburg, Izd-vo SPbGTI (TU), 2012. 316 p.

4. Medvedeva L.V., Yuzhakova N.A. Ustanovlenie prichiny pozhara s ispol'zovaniem

skanirujushhej zondovoj mikroskopii [Establishing the Cause of the Fire Using Scanning Probe Microscopy]. *Prirodnye i tehnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty)* [Natural and Man-Made Risks (Physical, Mathematical and Applied Aspects)], 2013, no. 1 (5), pp. 42-45.

5. Mironov V.L. *Osnovy skanirujushhej zondovoj mikroskopii: ucheb. posobie dlja studentov starshih kursov vuzov* [Fundamentals of Scanning Probe Microscopy: A Textbook for Senior Students of Universities]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2009. 143 p.

6. Morozov I.A. *Sovremennye problemy mehaniki. Teorija i praktika atomno-silovoj mikroskopii* [Modern Problems of Mechanics. Theory and Practice of Atomic Force Microscopy]. Perm, Izd-vo PGNIU, 2020. 108 p.

7. *Programma upravlenija SZM NOVA. Spravochnoe rukovodstvo* [NOVA MPS Management Program. Reference manual]. Moscow, ZAO «Nanotehnologija-MDT», 2008. 266 p.

8. Galishev M.A. et al., eds. *Rassledovanie pozharov: uchebnik* [Investigation of Fires: Textbook]. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskij universitet Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MChS Rossii, 2013. 192 p.

## **DETERMINATION OF INFLUENCE OF THERMAL EXPOSURE DURATION ON GLASS ROUGHNESS BY ATOMIC FORCE MICROSCOPY**

**Tatyana V. Kislova**

Senior Lecturer, Department of Forensic Examination and Physical Materials Science,  
Volgograd State University  
kislova.tatyana@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Vladimir V. Akatyev**

Senior Lecturer, Department of Forensic Examination and Physical Materials Science,  
Volgograd State University  
akatiev@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Konstantin O. Smirnov**

Senior Lecturer, Department of Forensic Examination and Physical Materials Science,  
Volgograd State University  
smirnov@volsu.ru  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Ilya M. Ukustov**

Specialist of Remote Support of Bailiffs,  
NAO First Client Bureau  
ilya-ukustov@mail.ru  
Rokossovskogo St, 62, 400050 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** When determining the location of the fire source and establishing local temperatures in the fire zone inside the building, window panes are often objects of expert research. By their nature, glasses have various physicochemical properties (optical characteristics, hardness, etc.), various internal (structure, defects, inclusions) and external (surface quality, presence of coatings) structures. Under fire conditions, under thermal and mechanical action, these properties may vary. The results of studying the microrelief of the glass surface subjected to heat treatment at different temperatures and heating times by atomic force microscopy are presented. Histograms of values of image elements (elevations of relief) were constructed based on results of scanning of samples relief and values of arithmetic mean and square mean roughness of glass surface before and after heat treatment were calculated. It has been found that the roughness of the glass surface decreases during the heat treatment process. The further development of studies by atomic force microscopy of window glass fragments that have been in the fire zone may make it possible to establish the temperature to which the glass fragments were subjected. The location of such fragments in the completed fire zone may indicate the direction to the location of the hottest combustion zone in accordance with a decrease in the roughness values of the window glass fragments that have been in the combustion zone.

**Key words:** atomic force microscopy, roughness parameters, glass, heat treatment, fire and technical expertise.