

**ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 539.381+620.178.151

**МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ МИКРОМАРКИРАТОР НА ОСНОВЕ
ГРАВИРОВАЛЬНОГО СТАНКА**

©2025 г. Е. Ю. Шелковников^а, П. В. Гуляев^{а,*}, К. С. Ермолин^{а,**}

^аУдмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения

Российской академии наук

Россия, 426067, Ижевск, ул. им. Татьяны Барамзиной, 34

**e-mail: lucac@inbox.ru*

***e-mail: ermolin@udm.ru*

Поступила в редакцию 14.02.2025 г.

После доработки 04.04.2025 г.

Принята к публикации 21.04.2025 г.

Статья посвящена модернизации устройства микромаркировки на основе серийного гравировального станка CNC2418. Целью модернизации является уменьшение размеров отдельных отпечатков маркировки. Для этого предложено повышать точность перемещений иглы маркиратора в вертикальном направлении и осуществлять контроль ее контактирования с поверхностью. Описан механический редуктор, сокращающий величину шагового перемещения по вертикальной оси с 10 до 1.5 мкм и состоящий из консольно закрепленной пьезобалки и цилиндрической пружины, соединенной с шаговым приводом. Описаны три способа контроля контактирования иглы маркиратора с поверхностью образца, основанные на измерении электромеханических параметров пьезобалки и использующие широкодоступные средства измерения, такие как осциллограф или мультиметр. Применение предложенных решений позволило снизить площадь отдельных элементов маркировки в 1.9 раза.

1. ВВЕДЕНИЕ

Защита от подделок и обеспечение аутентификации продукции приобретают все большую актуальность. Особое значение приобретает создание меток, наносимых силовой литографией с помощью игл-инденторов, которые трудно обнаружить при осмотре с использованием традиционных оптических средств. Такие метки помимо скрытности имеют уникальную форму, определяемую формой иглы-индентора, которую невозможно подделать. Однако создание

микромаркировки с размером отпечатка менее 100 мкм в настоящее время требует дорогостоящего специализированного оборудования (например, сканирующего зондового микроскопа или нанотвердомера). В результате разработка недорогих средств нанесения микромаркировки является актуальной задачей.

2. АНАЛИЗ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Недостатками маркиратора, описанного в работе [1], являются невысокая точность шаговых перемещений (примерно 10 мкм), визуальный контроль контактирования иглы с поверхностью и, как следствие, невозможность создания отпечатков с малыми поперечными размерами (менее 15 мкм).

Целью настоящей работы является доработка конструкции маркиратора для расширения инструментальных возможностей контроля контактирования и создания отпечатков меньших размеров, что имеет большое значение для повышения скрытности маркировки и уменьшения воздействия на маркируемую поверхность. Для достижения поставленной цели планируется решение следующих задач:

- снижение величины шаговых перемещений по оси Z ,
- инструментальный контроль контактирования.

Контроль контактирования предлагается осуществлять посредством мониторинга параметров, величины которых существенно изменяются в момент касания иглы маркиратора с поверхностью образца. К этим величинам можно отнести следующие.

1. Прогиб консольной балки держателя иглы. Величина прогиба находится в пределах от единиц микрон до единиц миллиметров и определяется деформацией балки, необходимой для создания силы упругости, передающейся через иглу к поверхности и формирующей маркировку.

2. Высота установки образца над основанием. Длина иглы должна обеспечивать прогиб балки в рабочем диапазоне, обеспечивающем необходимое воздействие на образец и не допускающем механического повреждения (пластической деформации) балки. Точность измерения прогиба должна составлять от доли до единицы микрометров, что обусловлено глубиной формируемой маркировки.

3. Сила воздействия на образец, величина которой, согласно работе [1], составляет единицы миллиньютон.

В качестве инструментов контроля контактирования может быть использован ряд промышленно выпускаемых датчиков.

Индуктивные датчики линейных перемещений могут использоваться для прямых измерений перемещения балки маркиратора и определения момента контактирования иглы и поверхности. Например, датчик серии F205g от компании Novotechnik [2] позволяет измерять перемещения до 5 мм с чувствительностью 4.5 В/мм. Общим недостатком индуктивных датчиков является наличие упругого механизма возврата штока, который создает дополнительное силовое воздействие на балку, сужающее рабочий диапазон прогибов балки.

Лазерные (оптические) датчики перемещений, например Mercury II 6000 [3], могут быть использованы для бесконтактного измерения перемещений балки. Их применение ограничивается высокой стоимостью, необходимостью юстировки и защиты от вибраций, присущих маркиратору.

Преимуществом датчиков силы является возможность их установки под образцом. Недостатками являются дополнительная податливость в силовой цепи маркиратора, а также относительно невысокая чувствительность, не позволяющая применять их с типовыми регистрирующими приборами без дополнительных усиливающих устройств. Например, датчик силы серии SEJ-Z производства ACRN [4] может измерять силу в диапазоне от 1 до 5 Н с чувствительностью $0.1 \cdot 10^{-3}$ В/Н. При измеряемых усилиях примерно 5 мН амплитуда выходного сигнала датчика составит около 0.5 мкВ, что будет находиться за пределами чувствительности типового осциллографа (около 0.2 мВ/дел.). Датчик Magtrol MBV-01 [5] позволяет получить выходной сигнал амплитудой 100 мкВ для усилий 5 мН при общем диапазоне 0.5 Н, что также требует дополнительных усиливающих устройств.

Учитывая сказанное выше, можно заключить, что наиболее предпочтительным вариантом является использование в качестве датчика уже имеющегося элемента конструкции маркиратора [1]. Примеры подобного подхода можно найти в работе [6], в которой описывается применение биморфных пьезоэлементов в качестве несущего и измерительного элементов датчиков давления и усилий. В случае с представленным маркиратором мы заменили упругую балку на изгибный пьезоэлемент. Например, может применяться биморф ЭП-9-61-ПлБ-025-01 от компании "Элпа" [7]. Однако более практичным оказался пьезоэлемент (пластина 35×12 мм²), вырезанный из униморфного пьезоизлучателя мембранного типа FML-35T- 3.0A1-L.

3. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Очевидным путем повышения точности перемещений по оси Z является применение высокоточных шаговых двигателей (шаг перемещений около 1 мкм и менее). Однако это может быть недоступно по технико-экономическим причинам. Более перспективной представляется модернизация механической части маркиратора. В частности, наличие в маркираторе [1] упругих элементов позволяет с минимальными изменениями сформировать редуктор линейных перемещений, подобный описанному в работе [8]. По аналогии с работой [8] система перемещения по оси Z маркиратора может состоять из шагового двигателя, мягкой цилиндрической пружины и консольной балки. В таком случае, в отличие от первоначального варианта (рис. 1а) маркиратора [1], образец следует сделать неподвижным, а иглу маркиратора расположить на консольной балке (рис. 1б).

Рис.1. Схема маркиратора до (а) и после модернизации (б)

На основе предложенных выше решений была модернизирована конструкция маркиратора [1], внешний вид которого представлен на рис. 2.

Рис. 2. Внешний вид модернизированного маркиратора.

В основу маркиратора положен гравировальный станок CNC2418 с трехкоординатной системой перемещения. Система перемещения по оси Z включает в себя шаговый двигатель NEMA17 1, цилиндрическую пружину 2 (диаметр 10 мм, длина в свободном состоянии 14 мм, шаг витков 2 мм, толщина проволоки 0.45 мм) с демпфером колебаний (вспененный полиэтилен) и пьезоэлемент 3 (консольная пластина). Игла фиксируется в иглодержателе 4, а образец 5 размещается на подвижном столе 6. Маркиратор управляется платой Arduino UNO и шаговыми драйверами DRV8825 с использованием программ на G-коде (стандарт ГОСТ 20999-83). Регистрация контакта осуществляется экспериментатором в процессе пошагового сближения иглы с поверхностью. В момент контакта позиция шагового привода запоминается в устройстве управления станка. Последующие отпечатки наносятся без контроля контактирования. В представленном маркираторе были опробованы три способа регистрации контакта иглы с образцом.

4. СПОСОБЫ РЕГИСТРАЦИИ КОНТАКТА С ОБРАЗЦОМ

Использование изгибного пьезоэлемента одновременно в качестве составной части редуктора и в качестве чувствительного элемента позволило упростить конструкцию

маркиратора. Рассмотрим некоторые варианты использования пьезоэлемента для регистрации момента контактирования.

4.1. Регистрация амплитуды (формы) сигнала пьезотклика

Наиболее очевидный способ – измерение напряжения, вызванного обратным пьезоэффектом. Амплитуда сигнала будет зависеть от деформации пьезоэлемента. В момент контакта иглы с образцом происходят прекращение изгиба и уменьшение напряжения, вызванного пьезоэффектом. Дальнейшее воздействие на пьезоэлемент со стороны шагового привода будет компенсироваться пружиной редуктора. На рис. 3 показан сигнал с пьезоэлемента при подводе к образцу в пошаговом режиме с шагом 1.5 мкм (шаг привода после редукции). Пьезоотклик при отсутствии контакта иглы с образцом представлен импульсами 1 и 2. Импульсы 3 и 4 характеризуются снижением амплитуды пьезоотклика, что свидетельствует о контакте иглы с образцом. Необходимо отметить, что на форму пьезоотклика влияют шумы шаговых двигателей. Уменьшение шага подвода приводит к снижению амплитуды пьезоотклика и отношения сигнал/шум, затрудняя детектирование момента контактирования.

Рис. 3. Сигналы отклика пьезоэлемента при подводе иглы к образцу.

4. 2. Регистрация амплитуды переменного напряжения сигнала на пьезоэлементе

Для контроля величины деформации пьезоэлементов широко используется частотно-резонансный метод [6, 9], согласно которому осуществляется возбуждение пьезоэлемента на резонансной частоте с последующим измерением амплитуды напряжения на обкладках. При контакте иглы с образцом происходит снижение амплитуды напряжения [10], что позволяет зарегистрировать момент контакта с образцом. Для представленного маркиратора реализация частотно-резонансного способа осуществлялась следующим образом. Синусоидальное напряжение амплитудой 22 В и частотой 2000 Гц с генератора Г4-53 подавалось на пьезоэлемент через разделительный резистор сопротивлением 432 кОм. Частота возбуждения пьезоэлемента подбиралась экспериментально непосредственно в собранной конструкции маркиратора. Критерием выбора служил максимум амплитуды сигнала пьезоотклика. Регистрация напряжения на пьезоэлементе выполнялась осциллографом АКТАКОМ АСК-2203 с внутренним сопротивлением 1 МОм. На рис. 4 представлены осциллограммы сигналов, зарегистрированные до и в момент контактирования иглы с образцом. Рисунок 4 показывает, что в момент контакта иглы с поверхностью амплитуда напряжения на пьезоэлементе снизилась с 400 мВ (рис. 4а) примерно до 370 мВ (рис. 4б). Незначительное изменение амплитуды сигнала в момент контакта

является одним из недостатков способа. Кроме того, периодически требуется подбор частоты возбуждения пьезоэлемента (например, после замены иглы маркиратора).

Рис. 4. Изменение амплитуды переменного напряжения на пьезоэлементе.

4. 3. Регистрация изменения емкости пьезопреобразователя

Известно, что механическая деформация пьезоэлемента изменяет его емкость [11]. Это можно использовать для контроля контактирования. Для этого с помощью мультиметра Sinometer VC6243+ проводилось измерение емкости пьезоэлемента в свободном состоянии и в деформированном состоянии при контакте с поверхностью. Емкость пьезоэлемента составляла 17.8 нФ до контактирования, она снизилась до 17.5 нФ после контакта с поверхностью. Полученные значения использовались в процессе сближения иглы с поверхностью для определения момента контакта. Следует отметить, что шумы, генерируемые шаговыми двигателями, негативно влияют на точность измерения емкости пьезоэлемента. Для снижения их влияния следует применять пошаговый режим подвода с задержкой измерений для стабилизации показаний емкости пьезоэлемента после каждого шага.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценим результаты использования предложенных решений. На рис. 5 представлены изображения отпечатков на позолоченной подложке (корпус микросхемы), полученных без применения редуктора (рис. 5а) [1] и с редуктором (рис. 5б), с использованием сканирующего зондового микроскопа Солвер Р47 фирмы NTMDT.

Рис. 5. Отпечатки до (а) и после (б) внедрения редуктора.

На рис. 5 видно, что применение редуктора позволило уменьшить среднюю площадь отпечатков с 82.25 мкм² до 42.5 мкм² (в 1.9 раза). Более значительного снижения можно добиться посредством повышения коэффициента редукции и точности метода контроля контактирования. При этом шероховатость маркируемой поверхности также должна быть меньше.

На рис. 6 представлены отпечатки, полученные одной иглой при различных способах контроля контактирования. Отпечатки получены следующим образом. Сначала устанавливался момент контакта иглы и определялась Z-координата поверхности. Затем формировался тестовый отпечаток посредством перемещения иглы до определенной Z-координаты, которая

была увеличена относительно базовой Z-координаты на 1.5 мкм (один шаг привода, деленный на коэффициент редукции).

Сравнительная оценка различных способов контроля контактирования осуществлялась по площади отпечатков иглы маркиратора. Оценка (рис. 6) показала, что представленные способы дали примерно одинаковую чувствительность к моменту контакта. Необходимо отметить, что на площадь отпечатков также оказывают влияние рельеф, твердость поверхности и форма иглы маркиратора. При этом наибольшую практическую ценность показал способ контроля сигнала пьезоотклика, осуществляемого непосредственно экспериментатором и реализуемого с помощью осциллографа.

Рис.6 Отпечатки, полученные одной иглой, при различных способах контроля...

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, модернизация маркиратора [1] осуществлена путем замены металлической пластины на пьезоэлектрическую и введением цилиндрической пружины, расположенной между шаговым приводом и пьезоэлектрической пластиной. Это обеспечило редукцию шагового перемещения вдоль вертикальной оси (в 6 раз) и возможность контроля контактирования иглы с поверхностью. В результате поперечные размеры отдельных отпечатков микромаркировки снизились до 10 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шелковников Е.Ю., Гуляев П.В., Ермолин К.С.* // ПТЭ. 2024. № 5. С. 180.
2. Position Transducers Linotast, Inductive Series F 200 g "ООО "РусАвтоматизация" ", 2024.
https://rusautomation.ru/upload/iblock/c43/mcre7k83ekguvg9ldfbsqap8k3s7f3xh/f200_katalog.pdf
3. Mercury II™ Series – MII6000 “Celera Motion, a Novanta Company”, 2024.
<https://www.celeramotion.com/optical-sensors/products/linear-encoders/compact/mercury-ii-series-mii6000/>
4. Mini SEJ-Z load cell with stop “ACRN”, 2021. <https://www.acrn.fr/en/product/load-cell-low-load/>
5. Miniature force transducers MBB-01 Series “Magtrol inc”, 2022.
<https://www.magtrol.com/wp-content/uploads/mbb01.pdf>
6. *Джагунов Р.Г., Ерофеев А.А.* Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления. Справочник. Санкт-Петербург: Политехника. 1994.

7. Пьезокерамические актюаторы изгибного типа “Элпа”, 2024.
https://www.elpiezo.ru/Datasheets/BYMORF_2020.pdf
8. *Альтфедер И.Б., Володин А.П., Хайкин М.С.* СССР Патент 1698914,1991.
9. *Wang L., Bai F., Hofmann V. et al.* // Chinese J. Mech. Engin. 2021. V. 34. P. 101.
<https://doi.org/10.1186/s10033-021-00623-x>
10. *Ghaffari, A., Shabestari, A.M., Heydari, B.* // Eur. Phys. J. Plus. 2022. V. 137. P. 487.
<https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-022-02670-2>
11. *Широкова В.П.* Пьезоэлектрические материалы и устройства. Справочник. Москва: Советское радио, 1978.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Схема маркиратора до (а) и после (б) модернизации: 1 – основание, 2 – держатель шагового двигателя, 3 – шаговый двигатель, 4 – образец, 5 – консольная балка, 6 – пружина.
- Рис. 2.** Конструкция модернизированного маркиратора: 1 – шаговый двигатель, 2 – пружина, 3 – пьезоэлемент, 4 – иглодержатель, 5 – образец, 6 – подвижный стол.
- Рис. 3.** Сигналы отклика пьезоэлемента при подводе иглы к образцу.
- Рис. 4.** Изменение амплитуды переменного напряжения на пьезоэлементе (развертка 65 мВ/дел., 500 мс/дел.) до (а) и после (б) касания.
- Рис. 5.** Отпечатки до (а) и после (б) внедрения редуктора.
- Рис. 6.** Отпечатки, полученные одной иглой, при различных способах контроля контактирования: по изменению емкости пьезоэлемента (а), по изменению амплитуды переменного сигнала возбуждения (б) и по сигналу пьезоотклика (в).

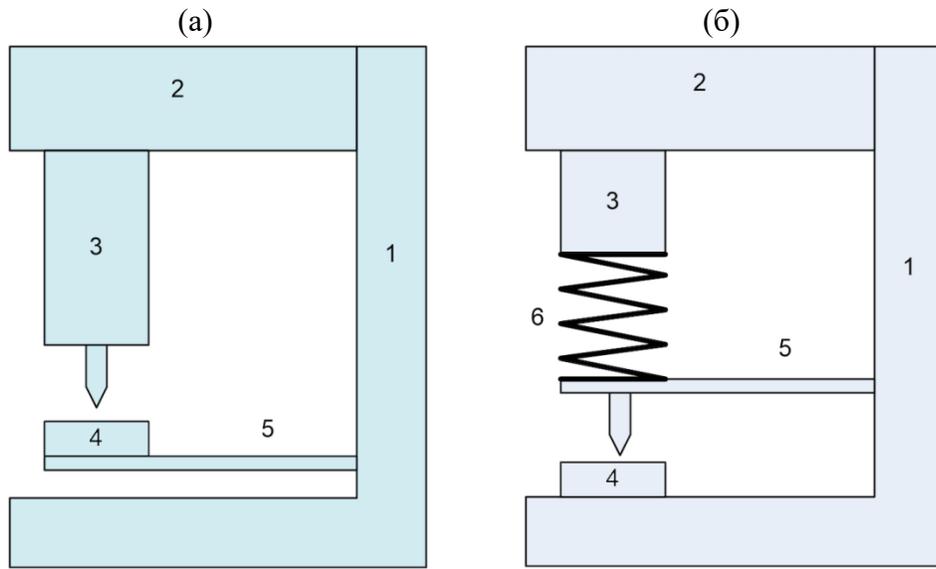


Рис. 1.

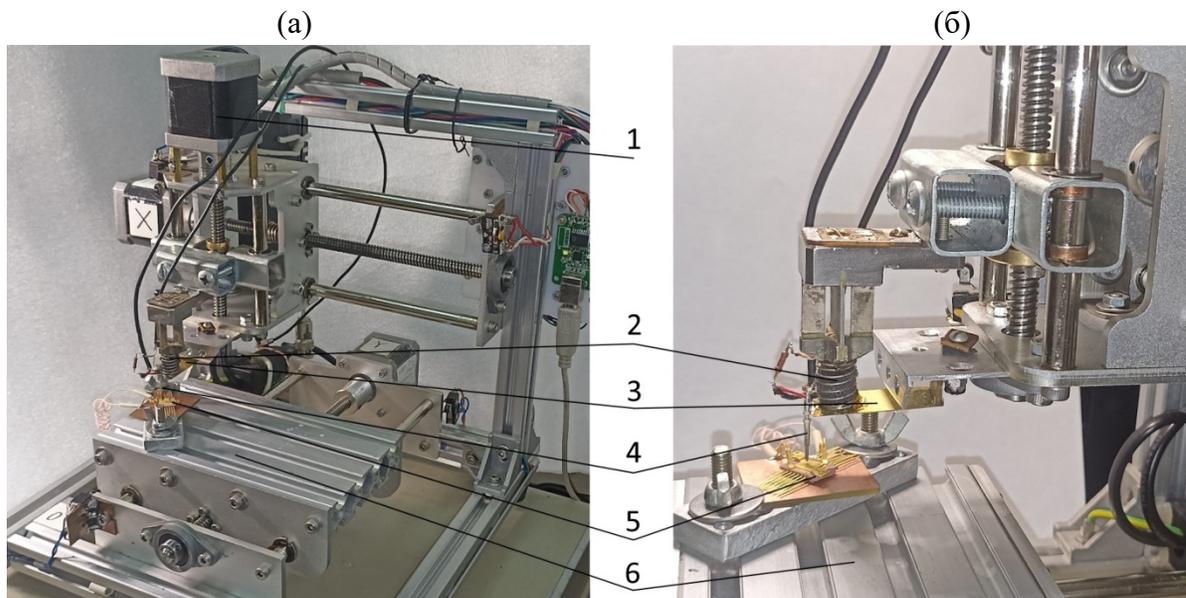


Рис. 2.

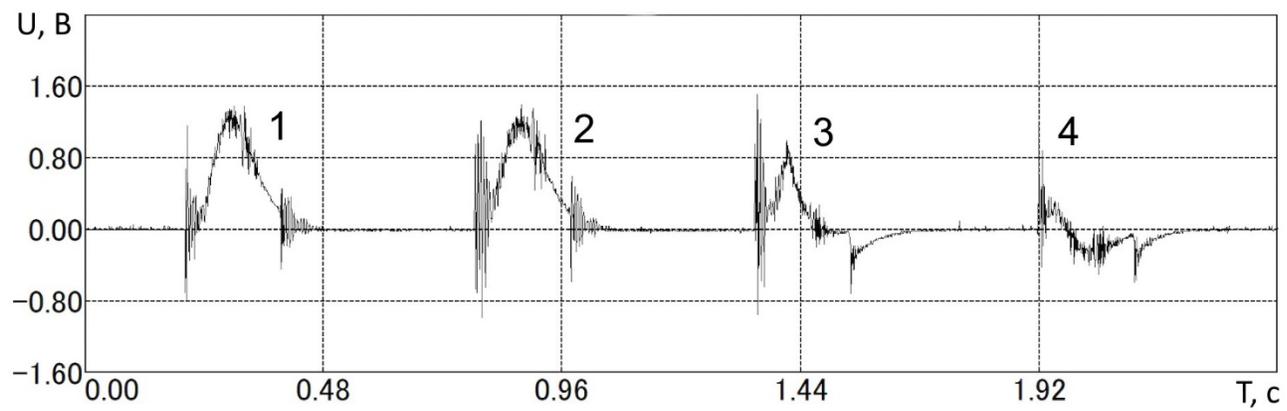


Рис. 3.

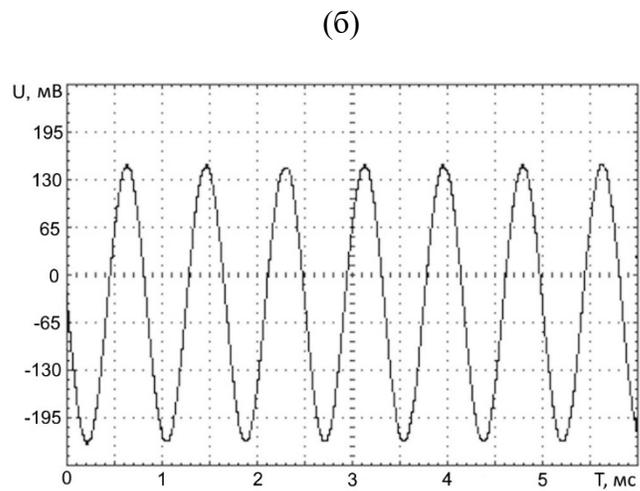
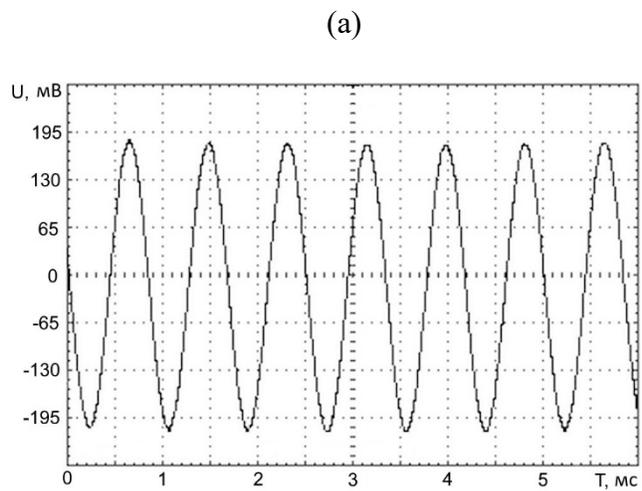


Рис. 4

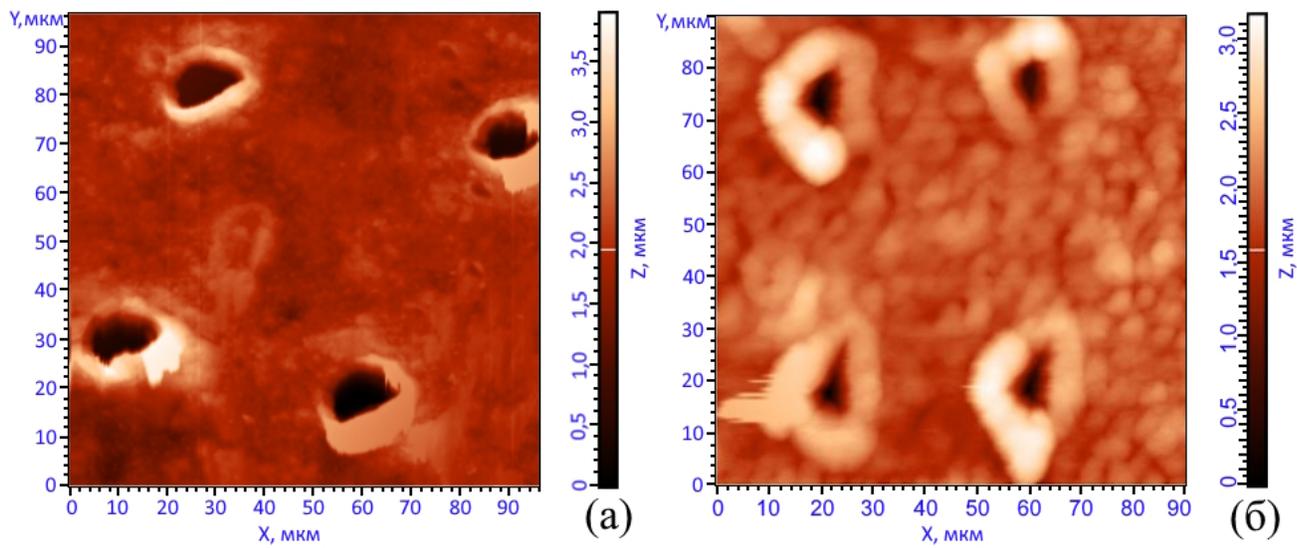


Рис. 5

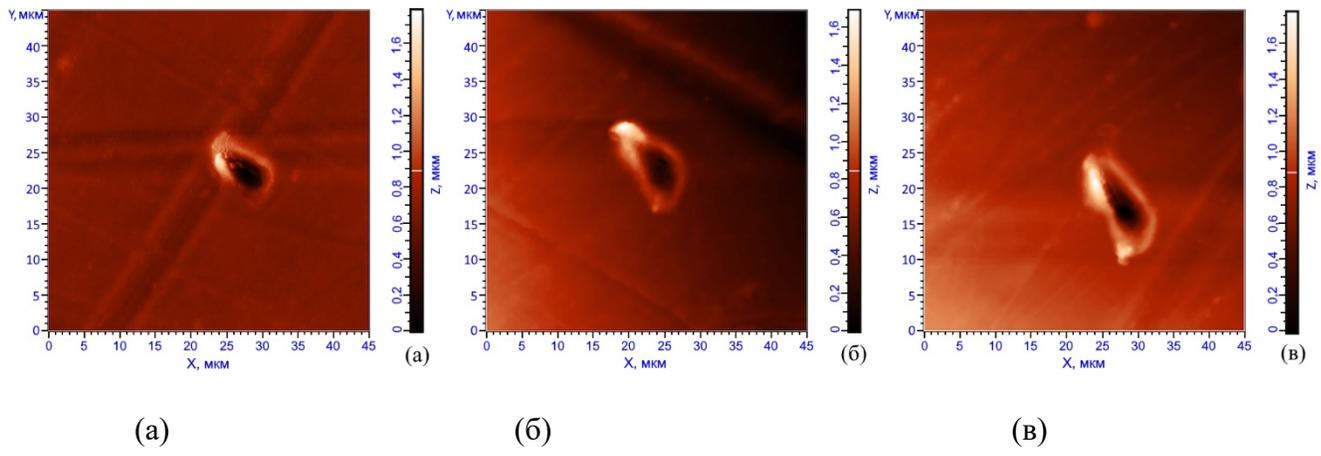


Рис. 6