

## Система микроманипулирования сенсиллами насекомых на основе сплава $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ с эффектом памяти формы

© С.В. фон Гратовски,<sup>1</sup> М.И. Жуковская,<sup>2</sup> А.М. Луничкин,<sup>2</sup> А.В. Шеляков,<sup>3</sup> Н.Н. Ситников,<sup>4</sup> В.В. Коледов,<sup>1,5</sup> К.А. Бородако,<sup>1,3</sup> С.Ф. Петренко<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, РАН  
125009 Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН,  
194223 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“,  
115409 Москва, Россия

<sup>4</sup> Государственный научный центр РФ „Исследовательский центр им. М.В.Келдыша“,  
125438 Москва, Россия

<sup>5</sup> Научно-технологический университет „Сириус“,  
354340 Сочи, Россия

e-mail: svetlana.gratowski@yandex.ru

Поступило в Редакцию 4 марта 2023 г.

В окончательной редакции 16 мая 2023 г.

Принято к публикации 25 мая 2023 г.

Для противодействия насекомым-вредителям необходимы фундаментальные знания об их физиологии и поведенческих реакциях. Однако ввиду малого размера насекомых вообще, и их сенсорных образований (сенсилл) в частности, изучение физиологии сенсорных систем насекомых до последнего времени было ограничено недостаточной точностью и избирательностью экспериментального механического воздействия. Для ликвидации данного пробела в изучении насекомых предложена физическая технология, основанная на микромеханическом устройстве — микропинцете на основе слоистого структурного композита из сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  с эффектом памяти формы (ЭПФ), совмещенном с системой температурного контроля и трехкоординатным пьезоэлектрическим микропозиционером. Микропинцет с ЭПФ селективно захватывает мельчайшие сенсиллы изучаемых насекомых, давая возможность их прецизионной механической стимуляции с одновременной регистрацией физиологических ответов, генерируемых сенсиллами, методами отведения импульсов в нервных центрах насекомого.

**Ключевые слова:** сплавы с эффектом памяти формы, микропинцет с ЭПФ, сенсиллы насекомых, отведение импульсов в нервных центрах насекомого.

DOI: 10.21883/JTF.2023.08.55987.37-23

### Введение

Насекомые благодаря своему обилию и разнообразию играют крайне важную роль в агроценозах (местах, на которых ведется сельское хозяйство). Вредные насекомые наносят огромный урон как посевам, так и запасам продовольствия на складах. С другой стороны, химические средства борьбы с ними имеют множество негативных эффектов — убивают насекомых-опылителей и энтомофагов. Следовательно, огромное значение имеет поиск принципиально новых подходов к проблеме контроля поведения насекомых. В этой связи решающее значение имеет экспериментальное изучение нервной деятельности насекомых и, в частности, их сенсорной системы. Сенсорный аппарат и набор воспринимаемых насекомыми аттрактивных, репеллентных и аверсивных механических и химических стимулов достаточно видоспецифичен. Поэтому экспериментальное изучение работы сенсорных органов различных насекомых совершенно необходимо, чтобы оценить, а затем и провести моделирование и протестировать в

лаборатории и полевых условиях наиболее эффективные стимулы и их комбинации в принципе, позволяющие влиять на поведение насекомых.

Насекомые — неистощимый источник микроинициальных технических решений, созданных за миллионы лет биологической эволюции. Сенсорная физиология насекомых — быстро развивающаяся область науки. Принципы работы их миниатюрных рецепторных структур используются при конструировании материалов с необычными свойствами, микромеханических устройств и сенсоров [1,2]. В ходе эволюции необходимость в ориентации в пространстве, избегании опасностей, поиске пищи и половых партнеров привела к возникновению разнообразных сенсорных структур, большая часть которых построена по сходному принципу и имеет общее происхождение.

Сенсиллы насекомых — производные полого кутикулярного волоска с сенсорными клетками внутри, настроены на восприятие в основном механических и химических стимулов. Видоизмененные механорецепторные

сенсиллы могут воспринимать инфракрасное излучение, изменение влажности [3,4], а также служить проприоцепторами, сигнализируя о взаимном расположении частей тела [5,6]. Эволюционно базовый, и встречающийся у большинства современных насекомых тип сенсилл — трихоидные (волосковые) сенсиллы — это полые хитиновые трубки с диаметром от долей микрона до десятков микрон. Длина сенсилл варьируется от  $8\ \mu\text{m}$  у таких разных по размерам насекомых как *Megaphragma tumaripenne* с длиной тела всего  $235\ \mu\text{m}$  [7] и американского таракана *Periplaneta americana*, длиной до  $5\ \text{cm}$  [8], до  $2200\ \mu\text{m}$  у пещерного сверчка *Phaeophilacris bredoides*, длина тела которого около  $2\ \text{cm}$  [9].

Сенсорные нейроны внутри сенсилл отвечают на адекватную стимуляцию увеличением частоты спайков (электрических импульсов), которые можно зарегистрировать внеклеточно с помощью микроэлектрода, при этом небольшое число сенсорных нейронов в сенсилле позволяет различить спайки от каждой клетки по их величине и форме [10]. Наибольшее число сенсилл у сверчков и родственных им насекомых находятся на двух парах сенсорных органов — антеннах, расположенных на голове, и церках — парных придатках брюшка, однако часть сенсилл находится на конечностях, крыльях и поверхности тела. Детальное изучение поведенческих ответов непоющих и лишенных тимпанальных (слуховых) органов сверчков *Ph. bredoides* свидетельствует о способности этих насекомых воспринимать звуки. Низкочастотные звуки вызывают колебания нитевидных сенсилл, которые максимальны при совпадении резонансной частоты собственных колебаний волоска и действующего на него звука и соответственно вызывают наибольший поведенческий ответ [11].

Морфологические особенности механосенсорных и хемомеханосенсорных (вкусовых) сенсилл свидетельствуют о неравнозначности разных направлений отклонения волоска, однако прямые экспериментальные исследования в этой области ограничиваются грубостью используемых инструментов, таких как поток воздуха [12]. Основание сенсиллы соединяется с основной кутикулой антенны мягкой и упругой сочленовной мембраной, в составе которой много белка-резиллина, обеспечивающего ее особые свойства [2]. Сложное по морфологии устройство сочленения ветрочувствительных сенсилл играет существенную роль в движениях участка, с которым контактирует рецепторная клетка [13].

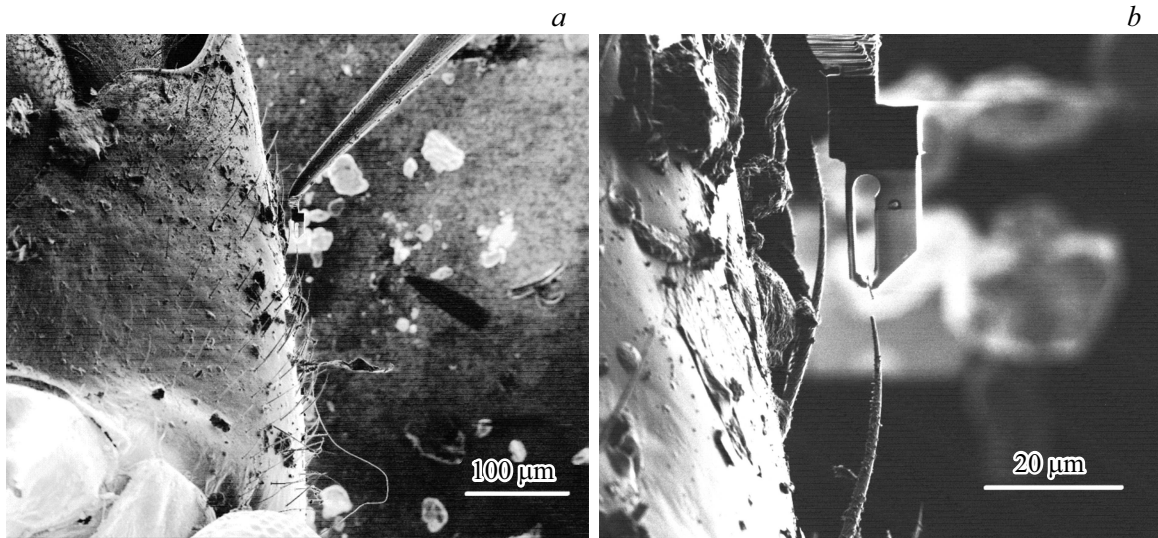
Механочувствительные волоски сенсилл разной длины имеют резонансные частоты колебаний от  $0.01$  до  $1\ \text{kHz}$  [14,15]. Моделирование колебаний волосков под действием потоков воздуха с использованием уравнения Эйлера–Бернулли выявило дополнительные резонансные частоты колебаний, причем следующая, после основной, частота примерно в 6 раз больше, а амплитуда колебаний на порядок меньше [16]. Поведенческие ответы сверчков на звук подтверждают появление дополнительного пика чувствительности церкального органа на

частотах, примерно в 6 раз больше основной с амплитудой на порядок меньшей. В нашем случае ответы на звуки  $3\text{--}6\ \text{kHz}$  дают те же сенсиллы, которые чувствительны к звуку  $0.5\text{--}1\ \text{kHz}$  меньшей интенсивности [9].

Ответы механорецепторного нейрона в контактной хемомеханосенсорной сенсилле показаны [17], но практически не исследуются, поскольку, с одной стороны, наибольший интерес вызывают ответы хемосенсорных клеток, а с другой — широко используемая методика отведений — *tip recording* — не позволяет выделить быстроадаптируемые ответы механосенсорного нейрона из-за артефактов при контакте отводящего электрода с сенсиллой, а также менять позицию волоска сенсиллы с точно регулируемыми параметрами — отклонением и его скоростью.

Стимуляция потоками воздуха и акустическими колебаниями затрудняет электрофизиологические отведения, создавая артефакты. Стимуляция механорецептора контактной хемомеханосенсорной сенсиллы в работе Марион–Полла [17] выполнялась посредством движения отводящего электрода, что не позволило оценить зависимость стимул-реакция и получить воспроизводимые данные импульсной активности механосенсорного нейрона. Несмотря на значительные успехи, сенсорная физиология насекомых нуждается в применении новых методов и инструментов для качественного прогресса в понимании механизмов механорецепции, особенно на уровне перирецепторных событий, а именно первичной трансформации энергии стимула в рецепторный потенциал сенсорной клетки.

Современная нанотехнология располагает уникальными методами, которые позволяют манипулировать, т.е. отбирать, захватывать, перемещать в трехмерном пространстве индивидуальные микро- и нанообъекты, такие, как нанотрубки, нанопроволоки и др. [18–21]. Ранее предпринимались попытки манипулирования сенсиллами насекомых при помощи нанопозиционеров и нанопинцетов с эффектом памяти формы (ЭПФ) в вакуумной камере сканирующего ионного микроскопа [22]. На рис. 1 представлены микрофотографии, полученные в сканирующем ионном микроскопе, отражающие процесс захвата и манипулирования сенсиллами комара *Culex pipiens* при помощи композитного нанопинцета с ЭПФ, закрепленного на микроманипуляторе Omniprobe. В этих экспериментах управление нанопинцетом, его сжатием — раскрытием, производится локальным нагревом нанопинцета при помощи излучения полупроводникового инжекционного лазера, встроенного в ионный микроскоп FEI Strata 201 FIB. Отрезание конца сенсиллы (рис. 1, b) производится ионным лучом ионного микроскопа в его вакуумной камере. Однако экспериментальная работа по исследованию сенсорного механизма насекомых *in vivo* требует комплексного решения проблемы наблюдения всего сенсорного органа насекомого, например, церки, в естественных условиях, выбора и контролируемого механического возбуждения одной из множества индивидуальных сенсилл, а также отведения



**Рис. 1.** *a* — отбор индивидуальной сенсиллы комара *C. pipiens* при помощи нанопинцета с ЭПФ, закрепленного на вольфрамовой микроигле, которая позиционируется наноманипулятором Omniprobe в вакуумной камере ионного микроскопа FEI Strata 201 FIB (мерная линейка 100  $\mu\text{m}$ ). *b* — захват и отрезание фрагмента сенсиллы *C. pipiens* ионным лучом микроскопа FEI Strata 201 FIB (мерная линейка 20  $\mu\text{m}$ ).

с помощью микроэлектродов и регистрации нервных импульсов, вызванных этим возбуждением.

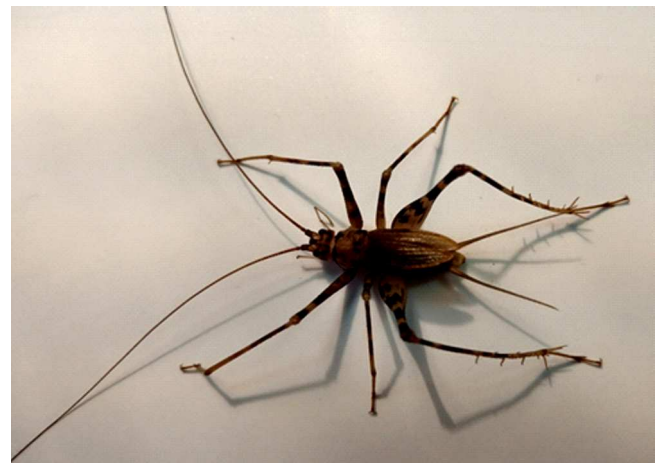
Целью настоящей работы является разработка методики изучения нервного отклика индивидуальных механочувствительных сенсилл насекомого. Эта методика отличается точностью и селективностью за счет применения микромеханических устройств: микропинцета из композита на основе сплава квазибинарной системы  $TiNi-TiCu$  с ЭПФ, совмещенного с трехмерным нанопозиционером на основе пьезомоторов.

## 1. Методика эксперимента

В качестве объекта исследования были выбраны взрослые самцы пещерного сверчка *Ph. bredoides*, внешний вид которого показан на рис. 2. По данным сканирующей электронной микроскопии церки покрыты большим числом сенсорных структур, сенсилл, которые можно разделить на четыре типа: булавовидные, щетинковидные, нитевидные (рис. 3, *a*) и кампаниформные (рис. 3, *b*).

Булавовидные сенсиллы располагаются только у основания церки и участвуют в восприятии силы тяжести [23]. Кампаниформные сенсиллы, располагающиеся вблизи основания нитевидных сенсилл, предположительно расширяют динамический диапазон сигналов, вызывая качественно отличные поведенческие реакции на сильные стимулы [24].

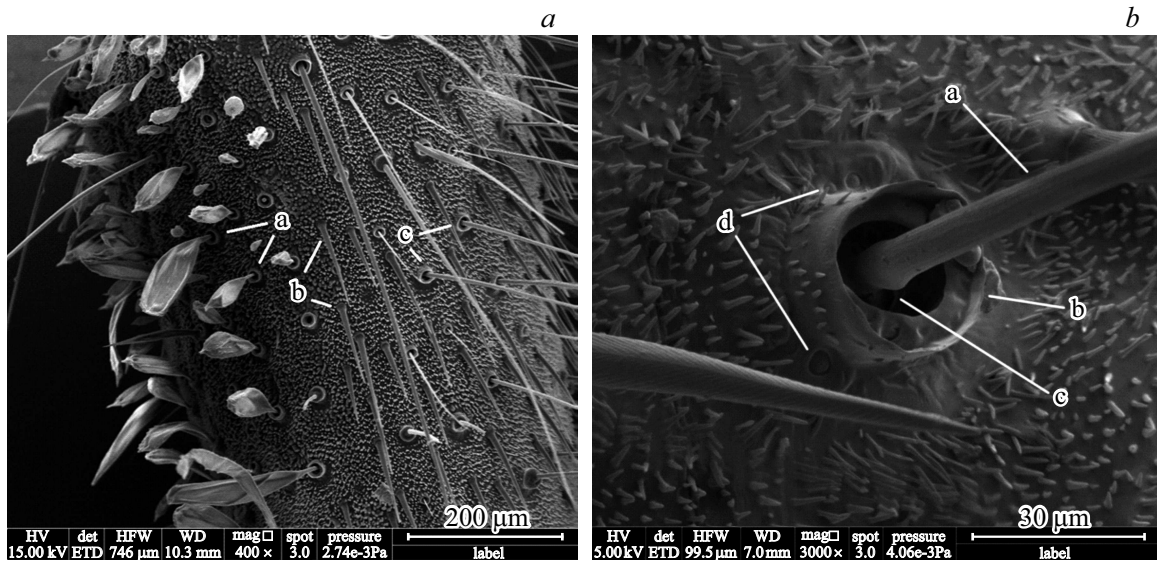
Поскольку хемомеханорецепторные (вкусовые) сенсиллы характеризуются порой на верхушке, через которую химические вещества проникают к рецепторной клетке, изучение церкальных сенсилл проводили методом ионтофоретического окрашивания. Для этого конец



**Рис. 2.** Взрослый самец сверчка *Phaeophilacris bredoides*.

брюшка сверчка с церками помещали в кювету с 0.05% раствором хлорида кобальта, к раствору был подведен хлорсеребряный электрод. Второй такой же электрод контактировал с брюшком сверчка через микропипетку, заполненную физиологическим раствором. Через препарат пропускали постоянный ток 1 mA в течение 30 min. Затем церки отрезали, инкубировали в 2% растворе сульфида аммония в течение 12 h для преципитации кобальта, а затем просматривали под бинокулярным микроскопом Микромед МС1 и фотографировали изображения при помощи видеокамеры DCM-130E SCOPE.

Для изучения параметров механорецепторных ответов нитевидных и щетинковидных сенсилл была разработана и изготовлена специальная система микроманипули-

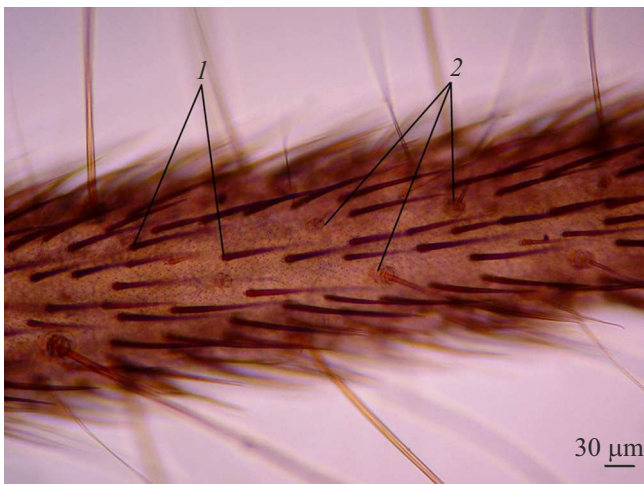


**Рис. 3.** СЭМ изображение церки сверчка *Ph. bredoides*: *a* — общий вид поверхности церки, *a* — булавовидные сенсиллы, *b* — щетинковидные сенсиллы, *c* — нитевидные сенсиллы; *b* — кампаниформные сенсиллы в основании нитевидной сенсиллы на церке *Ph. bredoides*. *a* — волосок ветрочувствительной сенсиллы, *b* — кутикулярная чаша, *c* — сочлененная мембрана, *d* — кампаниформные сенсиллы.

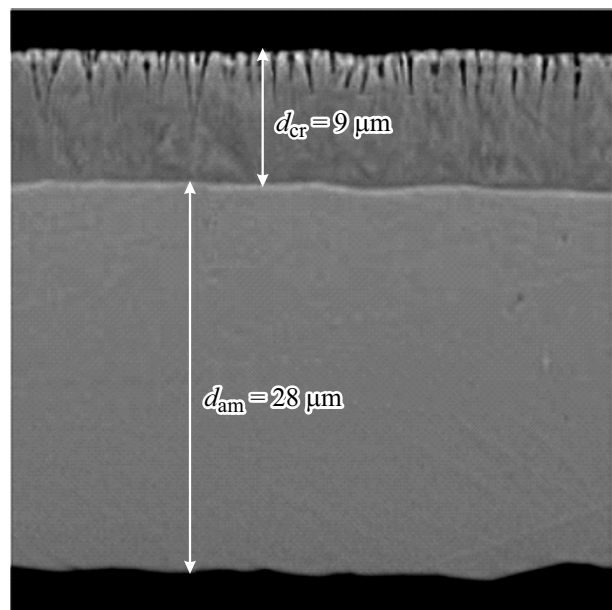
рования, включающая микромеханический инструмент (микропинцет) с блоком (устройством) управления и трехкоординатный позиционер. Система позволяет захватывать индивидуальную сенсиллу и отклонять ее заданным образом.

## 2. Результаты и обсуждение

Предварительные морфологические исследования указывают на преобладание двух типов сенсилл (рис. 4): нитевидных, в основании которых находится кольцевид-



**Рис. 4.** Церка сверчка *Ph. bredoides* ионтофоретическое окрашивание хлоридом кобальта. 1 — окрашенные контактные хеморецепторные сенсиллы; 2 — неокрашенные механорецепторные нитевидные сенсиллы.



**Рис. 5.** Характерное электронно-микроскопическое изображение поперечного сечения аморфно-кристаллической ленты из сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ .

ная кутикулярная чаша, и щетинковидных, с простым кутикулярным утолщением в базальной части. Щетинковидные сенсиллы оказались интенсивно окрашены, что свидетельствует о наличии поры, через которую поступает краситель. Функционально эти сенсиллы можно отнести к механо-хеморецепторным. Нитевидные сенсиллы остались неокрашенными, что подтверждает их чувствительность только к механическим стимулам.

В данном исследовании для разработки микропинцета был выбран сплав  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ , полученный методом быстрой закалки из расплава в виде тонкой ленты. Хорошо известно, что быстрозакаленные сплавы квази-бинарной системы  $TiNi-TiCu$  с содержанием меди более 17 at.% обладают высокой склонностью к аморфизации и приобретают ярко выраженный ЭПФ после специальной термообработки [25]. Ранее было показано, что в этом сплаве при скоростях охлаждения расплава в диапазоне  $10^5-10^6$  K/s образуется слоистый аморфно-кристаллический структурный композит с резкой границей раздела [26]. В работе была изготовлена серия образцов быстрозакаленных композитных лент, в которых соотношение толщин аморфного и кристаллического слоев варьировалось за счет изменения скорости охлаждения расплава. Электронно-микроскопическое изображение характерного поперечного сечения аморфно-кристаллической ленты представлено на рис. 5. Были получены образцы, которые имели толщины кристаллического  $d_{cr}$  и аморфного  $d_{am}$  слоев в диапазоне от 5.40 до 9.80  $\mu m$  и от 35.01 до 24.09  $\mu m$  соответственно.

Полученные образцы слоистых аморфно-кристаллических композитов после закалки проявляют обратимый ЭПФ (ОЭПФ) с изгибной деформацией. Реализация эффекта иллюстрируется рис. 6: в исходном состоянии при комнатной температуре (ниже температуры окончания мартенситного превращения  $M_f$  в кристаллическом слое) лента имеет форму, близкую к прямолинейной; после нагрева выше температуры окончания аустенитного превращения  $A_f$  образец принимает форму, близкую к кольцу, а при охлаждении до комнатной температуры возвращается в исходную прямолинейную форму. В работе [26] описана модель проявления ОЭПФ в слоистой аморфно-кристаллической структуре, согласно которой кристаллический слой оказывается растянутым после процесса закалки и при нагреве выше температуры

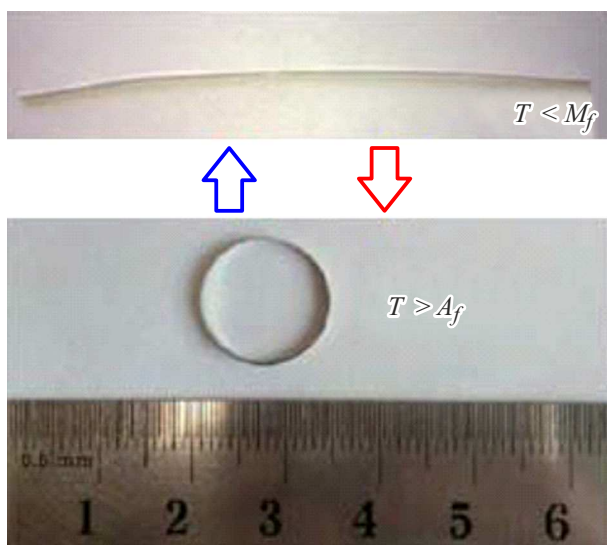


Рис. 6. Реализация ОЭПФ в аморфно-кристаллическом композите из быстрозакаленного сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ .

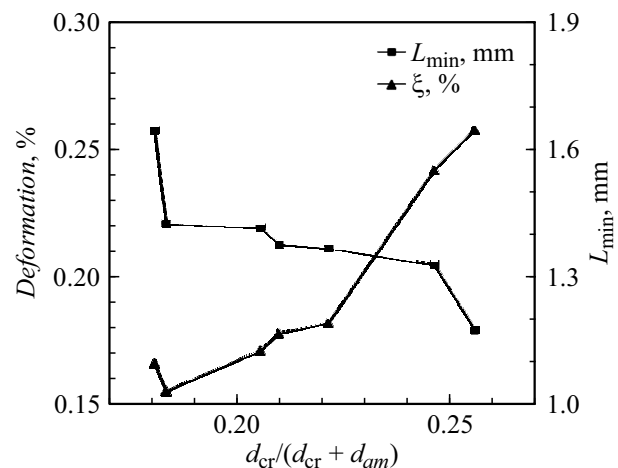


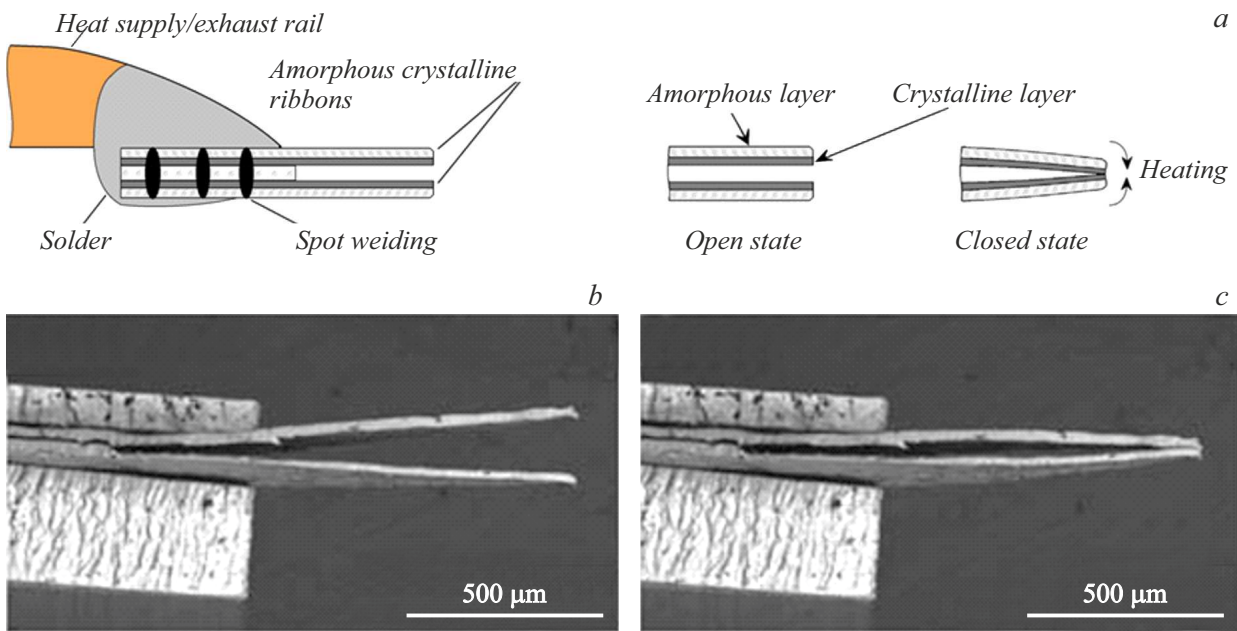
Рис. 7. Зависимости деформации  $\varepsilon$  и минимальной длины ленты  $L_{min}$ , обеспечивающей перемещение свободного конца  $\Delta = 60 \mu m$ , от соотношения толщин  $d_{cr}/(d_{cr} + d_{am})$ .

$A_f$  стремится к сжатию за счет реализации ЭПФ, что приводит к изгибу композита. При охлаждении за счет упругости аморфного слоя композит возвращается в исходное состояние. Экспериментально установлено, что при изменении температуры в интервале мартенситного превращения обратимое изменение формы композита может циклически повторяться более 20 000 раз.

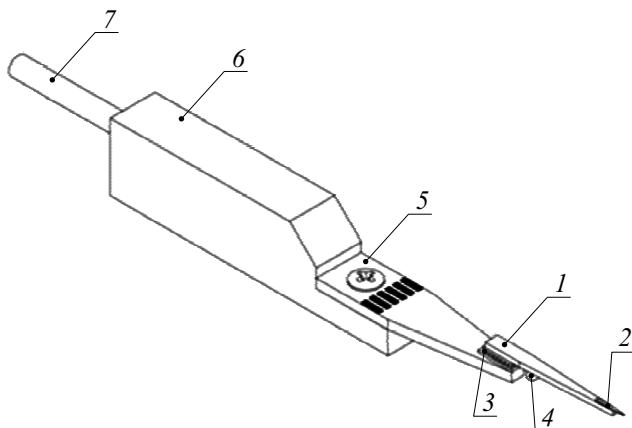
Измерен минимальный радиус изгиба  $R_{min}$  при проявлении ОЭПФ в образцах, приготовленных при различных скоростях охлаждения. Рассчитана обратимая изгибная деформация при проявлении ОЭПФ:  $\varepsilon = (d_{cr} + d_{am})/(2R_{min})$ . Зависимость  $\varepsilon$  от соотношения толщин аморфного и кристаллических слоев приведена на рис. 7.

Проведенные исследования аморфно-кристаллических лент позволили предварительно оценить геометрические параметры микропинцетов на их основе. В частности, для захвата микрообъектов с характерным размером до 100  $\mu m$  приемлемая начальная величина зазора микрозахвата должна быть ориентировочно 120  $\mu m$ . Если микрозахват состоит из двух лент, соединенных между собой с возможностью изгибаться за счет ОЭПФ навстречу друг другу, для обеспечения полного смыкания при нагреве перемещение свободного конца ленты должно составлять не менее 60  $\mu m$ . Для ленты длиной  $L$ , один конец которой жестко закреплен, а другой конец при нагреве смещается на величину  $\Delta$ , из геометрических расчетов получено соотношение:  $L = 2 \cdot R_{min} \cdot \arccos(\Delta/R_{min})$ . Была рассчитана минимальная длина рабочей части микропинцета  $L_{min}$ , обеспечивающая перемещение свободного конца  $\Delta = 60 \mu m$ , в зависимости от соотношения  $d_{cr}/(d_{cr} + d_{am})$  (рис. 7).

При выборе ленты учитывались ее однородность по толщине и шероховатость поверхности. На контактной стороне ленты формируются поверхностные дефекты, обусловленные качеством полировки закалочного дис-



**Рис. 8.** Схематическое изображение микропинцета на основе композитной ленты с ОЭПФ (а). СЭМ изображение микропинцета в открытом (b) и закрытом (c) состояниях.



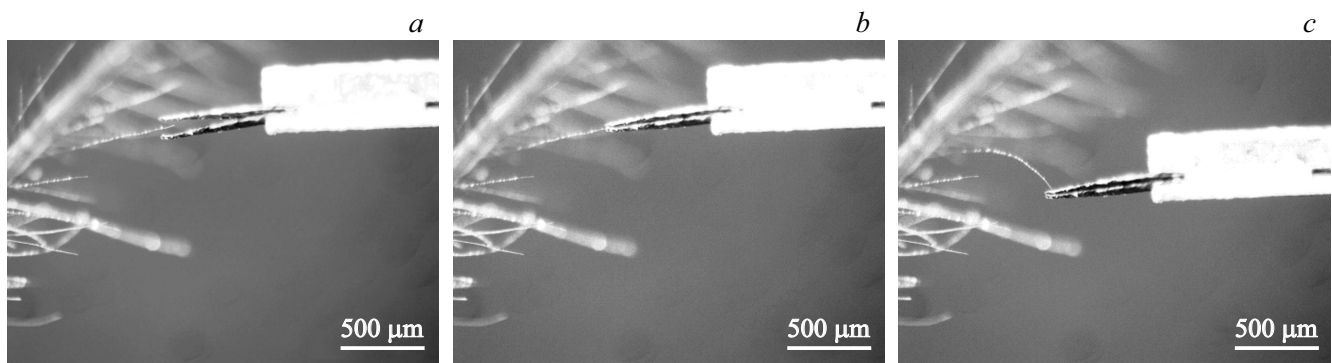
**Рис. 9.** Схема устройства контроля температуры для управления микропинцетом. Пояснения в тексте.

ка, а также возможным влиянием нестационарности струи расплава, например, возможным попаданием газа в область между расплавом и диском или инициированием вихрей в движущемся расплаве. Неконтактная (свободная) сторона ленты имеет относительно меньшую шероховатость, но ее толщина от центра ленты к краям заметно уменьшается. Экспериментальные измерения на профилометре показали, что для контактной поверхности лент среднее отклонение  $R_a$  находится в пределах от 0.63 до 0.85  $\mu\text{m}$ , среднеквадратичное отклонение  $R_q = 0.87\text{--}1.05 \mu\text{m}$ , в то же время для неконтактной поверхности  $R_a = 1.25\text{--}1.75 \mu\text{m}$ ,  $R_q = 1.35\text{--}1.62 \mu\text{m}$ .

В результате проведенных исследований для изготовления микропинцета был выбран образец с  $d_{am} = 24.69 \mu\text{m}$ ,  $d_{cr} = 7.03 \mu\text{m}$ ,  $R_{min} = 8 \mu\text{m}$  ( $\epsilon = 0.182\%$ ),  $L_{min} = 1.32 \text{mm}$ , обладающий оптимальным сочетанием механических (память формы) и поверхностных свойств. Были измерены температуры начала и конца восстановления формы данной ленты при нагреве:  $A_s = (48.2 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  и  $A_f = (57.1 \pm 0.5)^\circ\text{C}$  соответственно.

Процедура изготовления микропинцета заключалась в следующем. Два отрезка ленты накладывались друг на друга с возможностью изгибаться навстречу друг другу при нагреве. При этом для задания начального зазора микропинцета между ними помещалась прокладка из полностью аморфной ленты сплава TiNiCu, не проявляющей ЭПФ при нагреве и охлаждении. Далее ленты соединялись микросваркой, образуя трехслойный сэндвич (рис. 8).

Микропинцет устанавливался в устройство контроля температуры на основе элемента Пельтье. Схематический вид устройства показан на рис. 9. Оно включает основание 1 из серебра, на котором закрепляется микропинцет 2. Основание расположено на элементе Пельтье 3, который нагревает или охлаждает его. Термистор 4 измеряет температуру основания 1. Элемент Пельтье, термистор и основание установлены на консоль 5, которая присоединена к разьему 6, соединенному с трехкоординатным позиционером тонким штифтом 7. Устройство управляется контроллером DX5100, который представляет собой прецизионный программируемый блок управления термоэлектрическими охладителями (элементами Пельтье). Контроллер реализует



**Рис. 10.** Манипулирование сенсиллами сверчка *Pedophilias bredoides* с помощью микропинцета (*a* — микропинцет подведен к нитевидной сенсилле; *b* — захват кончика сенсиллы; *c* — отклонение сенсиллы).

двунаправленное (нагрев и охлаждение) регулирование и позволяет с высокой точностью поддерживать заданную температуру устройства или выполнять заданную программу нагрева и охлаждения во времени.

Температурную зависимость времени отклика (закрытие и открытие) микропинцета измеряли в окружающей среде по методике, описанной в [20]. Сначала на приборе устанавливается начальная температура  $T_1$  ниже начала мартенситного превращения в сплаве  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ , которая в общем случае может быть как выше, так и ниже комнатной температуры. Таким образом, при данной температуре сплав  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  гарантированно находится в мартенситной фазе. Затем происходит предварительный нагрев до температуры  $T_2$ , близкой к температуре начала аустенитного превращения. Повышение температуры до температуры  $T_3$  выше температуры окончания аустенитного превращения приводит к смыканию микропинцета. Охлаждение до начальной температуры  $T_1$  приводит к размыканию микропинцета. Затем рабочий цикл устройства при необходимости можно повторить. Был выбран оптимальный режим работы микропинцета: температура предварительного нагрева  $T_2 = 45^\circ C$  и температура перегрева  $T_3 = 71^\circ C$ , оптимальные времена закрытия и открытия пинцета при этом составляли 1.1 и 1.7 s соответственно. Важно отметить, что в условиях вакуума временные характеристики микропинцета оказались такими же, как и в окружающей среде.

Для перемещения микропинцета использовали трехкоординатный позиционер с шагом  $1 \mu m$ , а наблюдение за его работой проводили в оптическом микроскопе. С помощью разработанной системы реализуется полный технологический процесс манипулирования микрообъектом: захват—удержание—перемещение—освобождение. На рис. 10 продемонстрировано манипулирование сенсиллами африканского пещерного сверчка *Ph. bredoides*, которые селективно захватывались и отклонялись с заданной амплитудой.

## Заключение

В работе предложен метод исследования механочувствительных сенсилл насекомых, заключающийся в подаче прецизионных механических стимулов на механорецепторные и хемомеханорецепторные (вкусовые) сенсиллы насекомых при помощи системы микроманипулирования. Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Методом сверхбыстрой закалки из расплава получена серия слоистых аморфно-кристаллических композитов сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$ , обладающих обратимым эффектом памяти формы, с различным соотношением толщин аморфного и кристаллического слоев.

2. Полученные функциональные композиты послужили основой для изготовления серии микропинцетов с регулируемым зазором в диапазоне от 5 до  $120 \mu m$ , шириной захватных частей  $400\text{--}500 \mu m$  и их характерной длиной от  $650$  до  $1300 \mu m$  в зависимости от величины зазора.

3. Выявлено, что временные характеристики микропинцетов существенно зависят от температурного режима управления. Оптимальные параметры управления обеспечивают времена отклика (закрытие и открытие) микропинцета 1.1 и 1.7 s соответственно.

4. Показана возможность манипулирования — захвата и отклонения кутикулярного отдела сенсиллы с помощью системы манипулирования на основе быстро-закаленной аморфно-кристаллической ленты из сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  с обратимым эффектом памяти формы. В перспективе с помощью предложенного метода и расчетов механических свойств кутикулы волоска и сочленовой структуры можно будет оценить как динамический диапазон отклонений, в котором функционируют сенсиллы, так и точные соотношения между степенью отклонения волоска, направлением этого отклонения, и параметрами электрического ответа рецепторной клетки. Полученные данные будут полезны не только для анализа сенсорной системы насекомых, но и для конструирования миниатюрных и надежных механических сенсоров.

## Финансирование работы

Исследование физиологических особенностей нервной системы насекомых выполнено в рамках госзадания № 075-00967-23-00, работы по созданию системы микроманипулирования выполнены по гранту при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 22-19-00783), работы по изготовлению, исследованию и применению аморфно-кристаллических лент из сплава  $Ti_{50}Ni_{25}Cu_{25}$  выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 23-29-00779).

## Соблюдение этических стандартов

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены. Настоящая работа не содержит результатов каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] M. Dijkstra, J.J. Van Baar, R.J. Wiegerink, T.S. Lammerink, J.H. De Boer, G.J. Krijnen. *J. Micromech. Microeng.*, **15** (7), S132 (2005). DOI: 10.1088/0960-1317/15/7/019
- [2] S.N. Gorb. *Insect-Inspired Technologies: Insects as a Source for Biomimetics*. (In: A. Vilcinskas (eds) *Insect Biotechnology. Biologically-Inspired Systems*, Springer, Dordrecht, 2011). DOI: 10.1007/978-90-481-9641-8\_13
- [3] H. Altner, H. Sass, I. Altner. *Cell Tissue Res.*, **176** (3), 389 (1977). DOI: 10.1007/BF00221796
- [4] D. Klocke, A. Schmitz, H. Soltner, H. Bousack, H. Schmitz. *Beilstein J. Nanotechnol.*, **2** (1), 186 (2011). DOI: 10.3762/bjnano.2.22
- [5] Т.В. Кузнецова, И.Ю. Северина. *ЖЭБФ*, **45** (4), 425 (2009).
- [6] J.C. Tuthill, R.I. Wilson. *Curr. Biol.*, **26** (20), R1022 (2016). DOI: 10.1016/j.cub.2016.06.070
- [7] A.A. Polilov. *PLoS ONE*, **12** (5), e0175566 (2017). DOI: 10.1371/journal.pone.0175566
- [8] D. Shaller. *Cell Tissue Res.*, **191** (1), 121 (1978). DOI: 10.1007/BF00223221
- [9] А.М. Луничкин, М.И. Жуковская. *ЖЭБФ*, **57** (1), 44 (2020). DOI: 10.31857/S004445292101006X
- [10] F. Marion-Poll, T.R. Tobin. *J. Neurosci. Methods*, **37** (1), 1 (1991). DOI: 10.1016/0165-0270(91)90015-R
- [11] M.A. Landolfä, J.P. Miller. *J. Comp. Physiol. A*, **177** (6), 749 (1995). DOI: 10.1007/BF00187633
- [12] А.М. Луничкин, А.Н. Князев. *ЖЭБФ*, **53** (6), 425 (2017).
- [13] K. Joshi, A. Mian, J. Miller. *J. Biomech. Eng.*, **138** (8), 081006 (2016). DOI: 10.1115/1.4033915
- [14] C. Magal, O. Dangles, P. Caparroy, J. Casas. *J. Theor. Biol.*, **241** (3), 459 (2006). DOI: 10.1016/j.jtbi.2005.12.009
- [15] M. Kanou, T. Shimozawa. *J. Comp. Physiol. A*, **154** (3), 357 (1984). DOI: 10.1007/BF00605235
- [16] K.A. Slinker, C. Kondash, B.T. Dickinson, J.W. Baur. *Adv. Mater. Technol.*, **1** (9), 1600176 (2016). DOI: 10.1002/admt.201600176
- [17] F. Marion-Poll. *Entomol. Exp. Appl.*, **80** (1), 116 (1996). DOI: 10.1111/j.1570-7458.1996.tb00900.x
- [18] S. von Gratowski, V. Koledov, V. Shavrov, S. Petrenko, A. Irzhak, A. Shelyakov, R. Jede. *Advanced System for Nanofabrication and Nanomanipulation Based on Shape Memory Alloy* (In: *Frontiers in Materials Processing, Applications, Research and Technology*, Springer, Singapore, 2018)
- [19] V. Koledov, V. Shavrov, S. Von Gratowski, S. Petrenko, A. Irzhak, A. Shelyakov. *Conference Proceedings International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, 3M-NANO* (Taipei, Taiwan, 2014), 70573474. DOI: 10.1109/3M-NANO.2014.7057347
- [20] A. Shelyakov, N. Sitnikov, K. Borodako, V. Koledov, I. Khabibullina, S. von Gratowski. *J. Micro-Bio Robot.*, **16** (1), 43 (2020). DOI: 10.1007/s12213-020-00126-3
- [21] A.V. Shelyakov, N.N. Sitnikov, A.P. Menushenkov, R.N. Rizakhanov, A.A. Ashmarin. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.*, **79** (9) 1134 (2015). DOI: 10.3103/S106287381509018X
- [22] A. Kamantsev, A. Mashirov, P. Mazaev, V. Koledov, V. Shavrov, V. Dikan, A. Shelyakov. *Microsc. Microanal.*, **21** (S3), 1999 (2015). DOI: 10.1017/S1431927615010776
- [23] Г. И. Рожкова. *Нейрофизиология черкальной системы насекомых* (Наука, М., 1993)
- [24] R. Heußlein, H. Gras, W. Gnatzy. *Functional Coupling of Cercal Filiform Hairs and Campaniform Sensilla in Crickets* (In: S.N. Gorb (eds) *Functional Surfaces in Biology*, Springer, Dordrecht, 2009), DOI: 10.1007/978-1-4020-6697-9\_12
- [25] P. Schlossmacher, N. Boucharat, H. Rösner, G. Wilde, A.V. Shelyakov. *J. De Physique, IV: JP*, **112**(II), 731 (2003). DOI: 10.1051/jp4:2003986
- [26] A. Shelyakov, N. Sitnikov, S. Saakyan, A. Menushenkov, R. Rizakhanov, A. Korneev. *Mater. Sci. Forum*, **738–739**, 352 (2013). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.352