

УДК 53.043

**ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ
НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МЕМБРАННЫХ СТРУКТУР**

© 2024 г. Н. А. Дюжев^а, Е. Э. Гусев^а*,

Е. О. Портнова^а, О. В. Новикова^а

^аНациональный исследовательский университет “МИЭТ”,
Зеленоград, Москва, Россия

*e-mail: bubbledouble@mail.ru

Поступила в редакцию 23.08.2023 г.

После доработки 27.09.2023 г.

Принята к публикации 01.10.2023 г.

Впервые предложен, реализован и объяснен принцип модификации механических свойств тонкопленочных мембранных структур произвольной формы бесконтактным способом. Апробация идеи проведена на тонкопленочной мембране алюминия, сформированной магнетронным способом на кремниевой подложке. Внешнее воздействие осуществлялось посредством циклической нагрузки в виде сброса и подачи избыточного давления воздуха на мембрану. В результате многократных воздействий изменяются физические (размер зерен и шероховатость) и механические (внутренние механические напряжения и критическое избыточное давление) свойства материалов. Изменение величины остаточных механических напряжений в материале мембраны позволяет формировать поверхность с требуемым значением кривизны. В данной работе после циклической нагрузки давлением, равным половине от критического давления, выявлены следующие эффекты: прогиб мембраны в отсутствие внешнего воздействия увеличился более чем на порядок, структура перешла в пластический тип деформации, критическое давление разрыва уменьшилось на несколько десятков процентов. Применение данной методологии позволяет создавать новые материалы с уникальными механическими свойствами.

Ключевые слова: механические свойства, размер зерен, тонкие пленки, мембраны, механическая прочность, усталость, отказ, циклическая нагрузка

DOI: 10.31857/S1026351924020131, **EDN:** uvluoii

1. Введение. В процессе перехода от макро- к микроразмерам меняются свойства материалов. Известны сравнительные эксперименты [1] для толстой (3000 нм) и тонкой (400 нм) пленок, которые показывают, что с увеличением толщины возрастает размер и количество дефектов. Знание

механических свойств материалов позволяет разработчику более точно рассчитать конструкцию устройства, определить возможный диапазон рабочих параметров при эксплуатации.

Актуальность исследования подтверждается необходимостью минимизировать вероятность отказа при разработке конструкции устройства. Для этого нужно понимать механику различных режимов отказа, т.е. разрушения, усталости и ползучести. Несмотря на то, что причины отказа и поведение материалов могут быть известны, трудно гарантировать предотвращение отказов. Для металлических материалов 90% отказов возникает вследствие усталости [2–5]. При динамической нагрузке разрушение может произойти при уровне напряжения значительно более низком, чем предел прочности при статической нагрузке. Усталостное разрушение носит хрупкий характер даже в пластичных металлах.

Согласно данным [6], механизм разрушения материалов при циклической нагрузке выглядит следующим образом. Часто металлический материал представляет собой набор зерен, упорядоченных между собой и имеющих анизотропные свойства. В процессе циклической нагрузки происходит переход от упругой к пластической деформации, группы дислокаций перемещаются и постепенно концентрируются в локальной области материала. В случае работы с мембранами это означает изменение величины прогиба (разница между максимальной и минимальной величиной рельефа) при различном давлении. Обычно при испытаниях задают от 35 до 60% от максимальной нагрузки [2]. В системе мембрана/подложка область разрыва располагается на границе мембрана/подложка [7]. На следующей стадии возникают линии и плоскости скольжения, запускающие механизм упрочнения зерен кристаллов, что ведет к перераспределению механических напряжений в материале. При достижении максимальных напряжений, вызванных процессом упрочнения в зернах, начинают образовываться зародыши микротрещин по какой-либо плоскости скольжения (в локальной области максимальных напряжений). Обычно распространение микротрещин происходит по границам зерен [2]. Исследованию поведению трещин посвящен ряд работ [8, 9]. На последующих циклах нагрузки размеры зародышей микротрещин увеличиваются, что запускает процесс разрыхления зерна. Эффект разрыхления зерна снижает сопротивление материала к образованию трещины. Затем совокупность микротрещин рождает макротрещину. Причем наличие исходных дефектов в материале увеличивает вероятность возникновения макротрещины. Около 90% циклов нагрузки происходит до момента образования трещины. Остальные 10% циклов нагрузки ведут к критической деформации материала.

Для снижения вероятности отказа устройства повышают исходную механическую прочность наиболее уязвимого мембранного элемента. Известны следующие подходы: формирование мультислойной структуры вместо монослойной при сохранении общей суммарной толщины структуры [7], минимизация остаточных внутренних механических напряжений за счет подбора параметров технологического процесса формирования тонких пленок [10], изменение стехиометрического соотношения между атомами в

материале (например, увеличение концентрации углерода в SiC [11], уменьшение поверхностных дефектов; изменение размера зерен структуры; легирование материала пленки атомами меди, цинка, магния, марганца, кремния, минимизация концентраторов механических напряжений [7]. Нельзя не отметить новый подход к увеличению времени нагрузки — восстановление поверхности материала (минимизация количества и размера трещин) в виде расположения пленки в вакууме (в камере микроскопа). Для платины толщиной 40 нм за 40 мин размер трещины значительно уменьшился [5]. Таким образом, металлы обладают способностью к самовосстановлению в вакууме для материалов наноразмерной толщины. Также в традиционных металлических конструкциях для сопротивления усталости разрабатываются микроструктуры, которые либо останавливают, либо замедляют развитие трещин [5].

Наличие микроскопических дефектов или трещин объясняет разницу между теоретическими (основанные на энергиях связи атомов) и экспериментальными данными механической прочности. К факторам, вызывающим неравномерное распределение напряжений, также относят пустоты и выемки в материале [2]. Следовательно, формируя более сплошную пленку, можно минимизировать концентраторы механических напряжений.

Во всех случаях испытаний на усталость происходит многократное воздействие внешним фактором, например воздействие переменным током [12]. Это вызывает джоулев нагрев и эффект термоциклирования. Из-за разницы тепловых коэффициентов расширения материала возникают термические напряжения, что приводит к изменению топографии поверхности, возникновению неровностей или складок. Также напряжение переменного тока вызывает возникновение дислокаций, рост зерен и их вращение. В некоторых случаях используют короткий лазерный импульс для изменения свойств поверхности [13].

При испытаниях на усталость получают зависимость максимальных напряжений от количества испытаний ($S-N$), что характеризует область эксплуатации материала. Например, для некоторых сплавов железа зависимость $S-N$ переходит в линейную функцию, что свидетельствует о некотором пределе прочности, ниже которого не произойдет усталостный отказ. Согласно исследованиям, зависимость $S-N$ продолжает снижаться при увеличении количества циклов для таких металлов, как алюминий, медь, магний [2]. Одним из параметров, влияющих на момент разрушения материала, является амплитуда колебаний. Известно, что чем больше амплитуда при одинаковой максимальной величине нагрузки, тем раньше произойдет деформация.

К сожалению, часто существует разброс в данных по усталости, т.е. изменение измеренного значения N для ряда образцов, испытанных при одном и том же уровне нагрузки. Это отклонение может привести к значительной неопределенности при проектировании. Разброс результатов является следствием чувствительности усталости к ряду параметров испытаний и материалов, которые крайне сложно точно контролировать. Эти параметры включают изготовление образца и подготовку поверхности, атомный

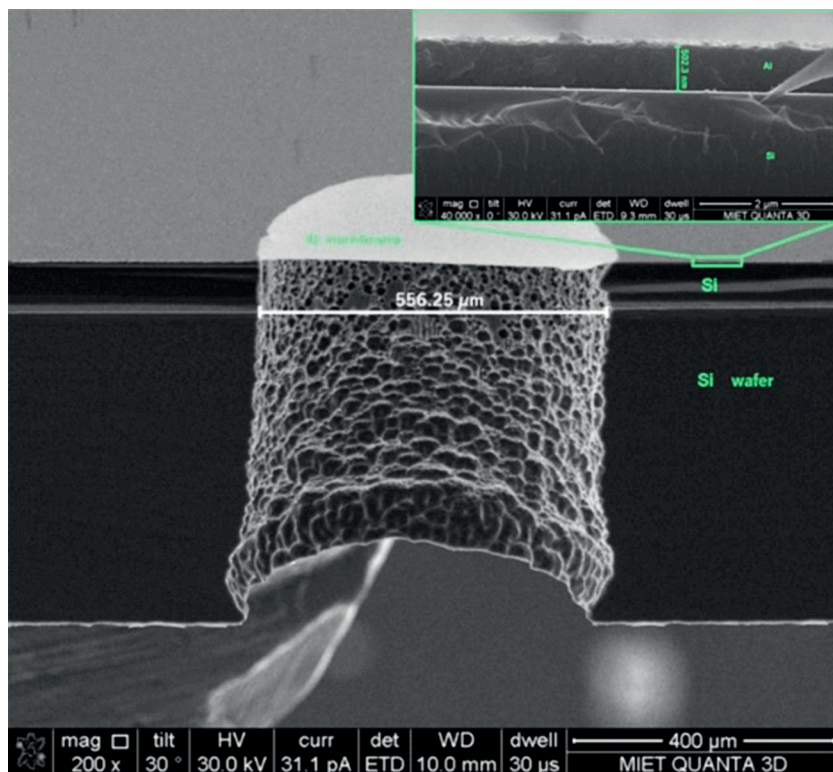


Рис. 1. Изображение мембраны на виде сбоку.

состав сплава металла, выравнивание образца в аппарате, среднее напряжение и частоту испытаний [2, 14].

При величине нагрузки, приводящей к упругой деформации, возникает многоцикловая усталость, значительно возрастает количество циклов до отказа (более чем 10^4 циклов) [2]. В данной работе количество циклов составило 10^3 , т.е. малоцикловой тип усталости.

2. Технологический маршрут изготовления тонкопленочного алюминия. Технологический маршрут изготовления тонкопленочного алюминия представлен в работе [15]. На рис. 1 приведены изображения во вторичных электронах поперечного сечения образцов тонких пленок на кремниевой подложке.

Экспериментальный диаметр мембраны, сформированный после травления Si-подложки, составляет 556 микрон. Толщина пленки монослоя алюминия составляет 502 ± 10 нм.

3. Измерение механических свойств. Контроль механических свойств осуществлялся на стенде, описанном в работе [7]. Стенд включает в себя оптический профилометр, манометры, ресивер, магистральную систему подачи избыточного давления воздуха, программный комплекс для управления

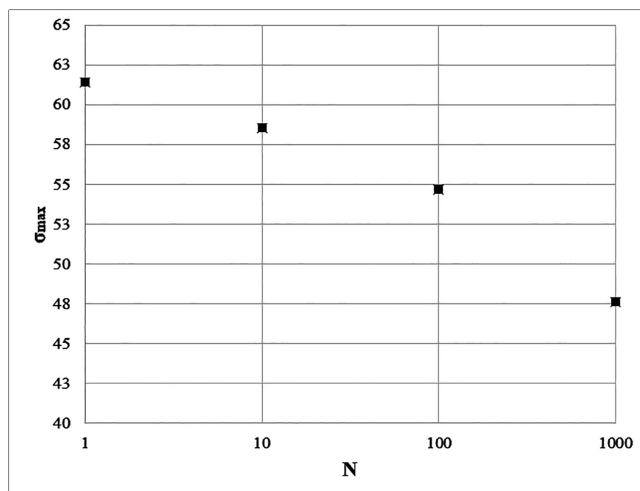


Рис. 2. Характеристика усталости материала. По оси х – N – количество циклов нагрузки (шт). По оси у – $\sigma_{\max}$ – максимальное напряжение, измеряемое в ГПа.

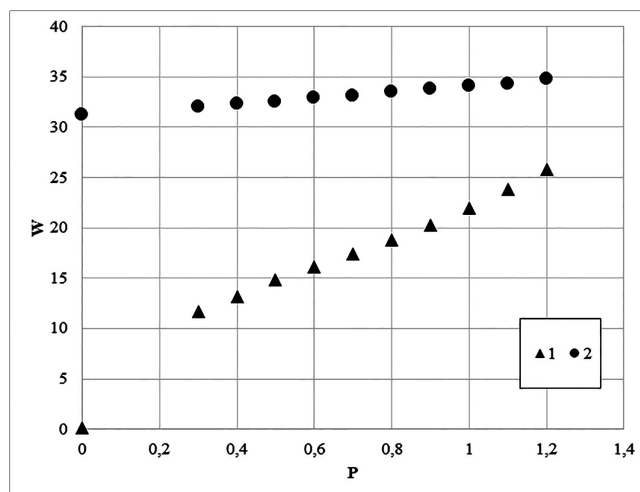


Рис. 3. Сравнение механических свойств до и после циклической нагрузки. По оси х – P – избыточное давление, измеряемое в атм. По оси у – W – прогиб мембраны, измеряемый в мкм. Легенда: 1 – до циклической нагрузки, 2 – после циклической нагрузки.

давлением. В результате, обеспечивая бесконтактное воздействие на мембрану за счет давления воздуха (без внесения дополнительных механических напряжений на структуру), можно получить значение давления разрыва мембраны и величину двухосного модуля упругости.

Механическая прочность кремниевых мембран рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\text{пр}} \cdot a^2 \cdot B(\mu)}{h^2}, \quad (3.1)$$

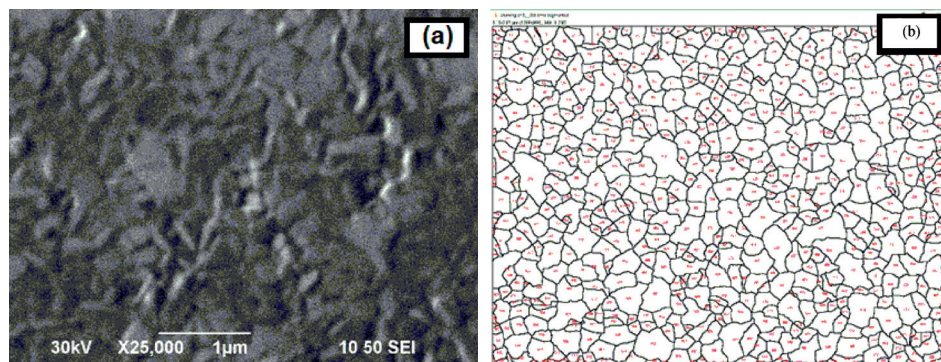


Рис. 4. Анализ размера зерен:

а) фотография с РЭМ; б) результат анализа в программе ImageJ.

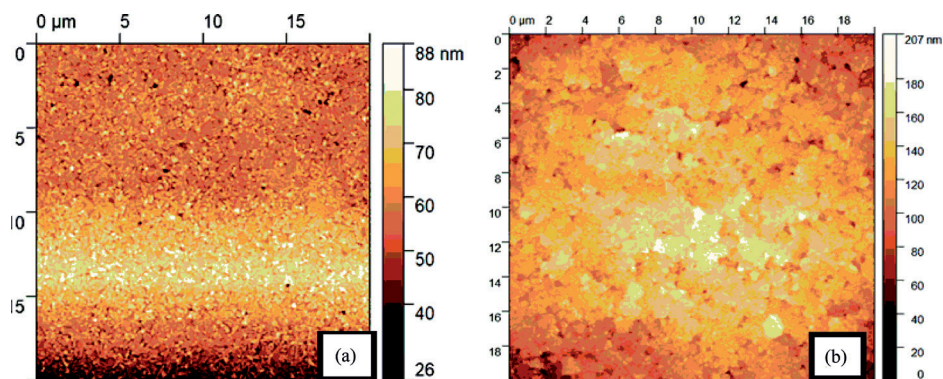


Рис. 5. Анализ шероховатости поверхности:

а) до нагрузки; б) после нагрузки.

где $P_{пр}$ — избыточное давление критической деформации структуры, a — радиус мембраны, $B(\mu)$ — коэффициент, h — толщина мембраны, μ — коэффициент Пуассона.

Коэффициент $B(\mu)$ рассчитывается как $\frac{3}{4}\sqrt{1+\mu^2}$. Итоговое значение механической прочности материала алюминия определялось как среднее арифметическое значение. На рис. 2 показаны результаты измерений механической прочности (максимальное механическое напряжение) в зависимости от количества циклов нагрузки.

На рис. 3 показаны результаты измерения профиля поверхности (величина прогиба — это разница между максимальным и минимальным значением рельефа).

Заметно, что увеличился прогиб мембраны в отсутствие внешнего воздействия с 0.13 ± 0.04 до 31.22 ± 0.27 мкм, структура перешла в пластический тип деформации. Критическое давление разрыва изменилось с 2.53 ± 0.04 до 1.96 ± 0.06 атм. Механическая прочность уменьшилась на 23% (с 61 до 48 ГПа).

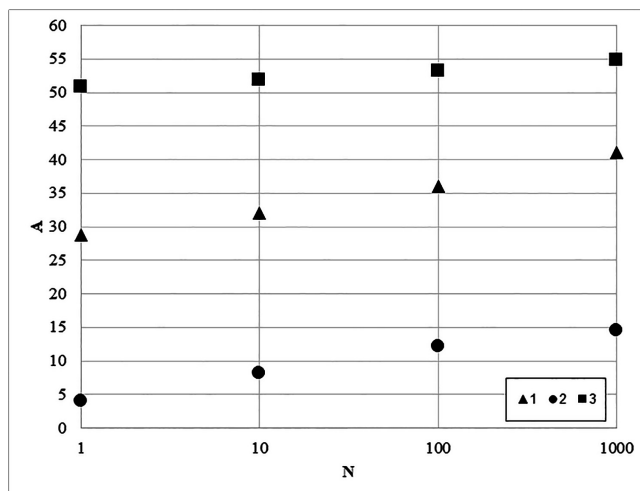


Рис. 6. Зависимость размера зерен и шероховатости поверхности от циклов нагрузки. По оси x — N — количество циклов нагрузки (шт). По оси y — A — характеристика поверхности, измеряемая в нм. Легенда: 1 — размер зерен, измеренный при помощи РЭМ; 2 — шероховатость мембран, измеренная при помощи АСМ; 3 — размер зерен (ОКР), полученный при помощи рентгеновского дифрактометра.

Известны случаи изменения механических свойств материала после внешнего воздействия. В результатах работы [16] указано, что по результатам моделирования величина удлинения алюминия снижается на 62% после внешнего воздействия в виде облучения материала. В работе [15] указано, что с увеличением дозы радиационного облучения значение механической прочности уменьшается с 61 до 45 ГПа (27%).

С помощью программы ImageJ сделан расчет количества зерен и их площади в области мембран. Изображение для анализа получено на микроскопе. Данная программа используется в мировом сообществе для подсчета количества частиц на образце [17].

Результат анализа размера зерен при фиксированной площади анализа показал, что при увеличении количества циклов нагрузки до 10^3 циклов средний размер зерен увеличился с 28.75 ± 2.53 до 41.0 ± 0.5 нм.

Также для определения размера зерен использовался рентгеновский дифрактометр Rigaku с длиной волны излучения $1,541 \text{ \AA}$, напряжением на рентгеновской трубке 40 кВ и анодным током 30 мА. Для определения шероховатости поверхности использовался атомно-силовой микроскоп.

Обобщенные результаты характеристики поверхности показаны на рис. 6.

Таким образом, результаты анализа поверхности объясняют эффект уменьшения механической прочности в процессе нагрузки за счет увеличения размера зерна и шероховатости на тонкопленочной алюминиевой мембране. Изменение размера зерна составило с 28.75 ± 2.53 до 41.0 ± 0.5 нм при анализе изображений с микроскопа, с 50.8 до 54.8 нм при анализе размера зерен на дифрактометре. Изменение величины шероховатости поверхности на атомно-силовом микроскопе составило от 3.99 ± 0.25 до 14.56 ± 0.44 нм.

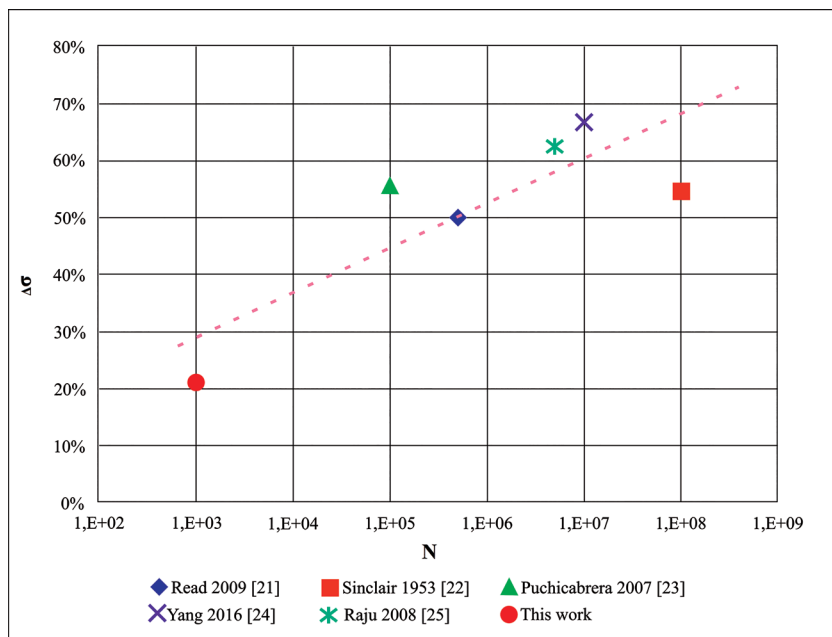


Рис. 7. Изменение прочности алюминия при циклической нагрузке. По оси x – N – количество циклов нагрузки (шт.). По оси y – $\Delta\sigma$ – изменение прочности, измеряемое в %.

Различные авторы проводили оценку механической прочности материалов от размера зерен по прямому и обратному закону Холла–Петча [18]. В работе [19] указано, что для диапазона размера зерен металлов от 10 до 35 нм работает обратный закон Холла–Петча. При размере зерен более 35 нм начинает работать прямой закон Холла–Петча, т.е. механическая прочность обратна пропорциональна корню из размера зерна ($\sigma_{\text{макс}} \sim 1/\sqrt{d}$). Полученные тенденции в текущей работе (при размере зерен от 28.75 нм) совпадают с тенденциями работы [19].

В результате сравнительного анализа (рис.7) нельзя не отметить, что подобные эффекты изменения механической прочности от внешнего воздействия были выявлены ранее, но либо для материалов пленок на сплошной подложке, либо изготовленных другим методом, либо определенной формы (например, гантелеобразной). Известно изменение прочности различных пленок: прочность пленки меди уменьшается от 260 до 200 МПа при воздействии 10^6 циклов [20], прочность материала титана – от 200 до 100 МПа в течение 10^6 циклов [13]; прочность алюминия – с 200 до 100 МПа при вариации количества циклов от $3 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^5$ циклов [21] и с 420 до 190 МПа при вариации количества циклов от 10^4 до 10^8 циклов [22]; прочность сплава алюминия 7075 толщиной несколько миллиметров изменяется от 450 до 200 МПа при вариации количества циклов от 10^3 до 10^5 [23]; прочностные характеристики алюминиевых сплавов LY12-CZ, 2024-T4, 7475-T7351 и 7075-T651 уменьшаются от 240 до 80 МПа в течение 10^7 циклов нагрузки

[24]; прочность алюминиевого сплава А356.2-Т6 гантелеобразной формы толщиной несколько миллиметров уменьшается от 240 до 90 МПа в течение $5 \cdot 10^6$ циклов нагрузки [25]. Сравнительный график результатов, полученных в данной работе, и данных в мире показан на рис. 7.

4. Выводы. Предложен принцип модификации поверхности тонкопленочных мембранных структур произвольной формы бесконтактным способом. Реализация принципа осуществлена на примере тонкопленочных мембранных структур из алюминия, сформированного магнетронным способом на Si-подложке. Данный принцип объясняется изменением характеристики поверхности. С увеличением количества циклов нагрузки до 1000 значение механической прочности уменьшается с 61 до 48 ГПа (23%). Критическое давление разрыва изменилось с 2.53 ± 0.04 до 1.96 ± 0.06 атм. Данный эффект можно объяснить увеличением размера зерна и шероховатости на тонкопленочной алюминиевой мембране согласно прямому соотношению Холла–Петча. Было выявлено увеличение размера зерна с 28.75 ± 2.53 до 41.0 ± 0.5 нм на микроскопе и с 50.8 до 54.8 нм на дифрактометре. По результатам измерения на атомно-силовом микроскопе величина шероховатости поверхности возросла с 3.99 ± 0.25 до 14.56 ± 0.44 нм.

Сравнивая полученный эффект с результатами работ других исследователей, можно заметить, что подобные эффекты изменения механической прочности от внешнего воздействия были выявлены ранее, но либо для материалов пленок на сплошной подложке, либо изготовленных другим методом.

Предлагаемый метод внешнего воздействия (через избыточное давление) имеет преимущество по сравнению со стандартными методами нагрузки гантелеобразной пленки, т.к. не вносится дополнительного механического напряжения в исследуемый материал при воздействии. Также не происходит тепловой деградации поверхности, как в случае с лазерным облучением. В предлагаемом методе нет необходимости формировать пленку определенной формы.

Изменение величины прогиба мембраны свидетельствует об изменении остаточных механических напряжений в материале мембраны. Это позволяет формировать поверхность с необходимой величиной кривизны. Данный эффект можно использовать для управления исходным прогибом мембраны, что позволяет изменять объем рабочей полости у МЭМС-датчика давления, состоящего из нескольких кристаллов с мембраной. Тем самым улучшается чувствительность прибора, что позволяет расширить диапазон измерения давления.

В мировой практике исследование зависимости механической прочности при многократном бесконтактном воздействии на мембрану из тонкопленочного Al, полученного методом магнетронного осаждения, произвольной формы, проведено ранее не было, что подтверждает новизну данного экспериментального исследования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования, соглашение № 075-15-2021-1350 от 5.10.2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang G.P., Schwaiger R., Volkert C.A., Kraft O. Effect of film thickness and grain size on fatigue-induced dislocation structures in Cu thin films // *Philos. Mag. Lett.* 2003. V. 83. № 8. P. 477–483.
<https://doi.org/10.1080/0950083031000151383>
2. Calister W.D. Materials science and engineering: an introduction. 7th Edition. NY, 2007.
3. Wang G., Liaw P. Fatigue and fracture behavior // *Bulk metallic glasses*. Boston: Springer, 2008. P. 169–203.
https://doi.org/10.1007/978-0-387-48921-6_7
4. Pan Q., et al. History-independent cyclic response of nanotwinned metals // *Nature*. 2017. № 551. P. 214–217.
<https://doi.org/10.1038/nature24266>
5. Barr C.M., Duong T., Bufford D.C. et al. Autonomous healing of fatigue cracks via cold welding // *Nature*. 2023. № 620. P. 552–556.
<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06223-0>
6. Заславский Б.В. Краткий курс сопротивления материалов. Учебник для авиационных специальностей вузов. М.: Машиностроение, 1986. 328 с.
7. Dyuzhev N.A., Gusev E.E., Makhiboroda M.A. Study of the mechanical properties of thin-film membranes made of oxide and silicon nitride. // *Mechanics of Solids*. 2022. V. 57. № 5. P. 1044–1053.
8. Перельмутер М.Н. Анализ трещиностойкости соединений материалов // *Изв. РАН. МТТ*. 2020. № 4. С. 96–114.
<https://doi.org/10.31857/S0572329922050063>
9. Бабешко В.А., Бабешко О.М., Евдокимова О.В. Трещины нового типа и модели некоторых наноматериалов // *Изв. РАН. МТТ*. 2020. № 5. С. 13–20.
<https://doi.org/10.31857/S0572329920050025>
10. Novak A.V., Novak V.R., Dedkova A.A., Gusev E.E. Dependence of mechanical stresses in silicon nitride films on the mode of plasma-enhanced chemical vapor deposition // *Semiconductors*. 2018. V. 52. P. 1953–1957.
<https://doi.org/10.1134/S1063782618150095>
11. Shikunov S.L., Kurlov V.N. SiC-based composite materials obtained by siliconizing carbon matrices // *Technical Physics*. 2017. V. 62. P. 1869–1876.
<https://doi.org/10.1134/S1063784217120222>
12. Беспалов В.А. и др. Обзор методов исследования механических свойств тонких пленок // *Моделирование систем и процессов*. 2022. Т. 15. № 3. С. 110–128.
<https://doi.org/10.12737/2219-0767-2022-15-3-110-128>
13. Колобов Ю.Р. и др. Исследование влияния обработки лазерными импульсами наносекундной длительности на микроструктуру и сопротивление усталости технически чистого титана // *Письма в ЖТФ*. 2022. Т. 48 (2). С. 15–19.
<https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.02.51913.19025>
14. Марков В.Ф. Технология тонкопленочных твердотельных сенсоров. Учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2019. 152 с.
15. Дюжев Н.А., Гусев Е.Э., Портнова Е.О., Махиборода М.А. Исследование влияния радиационного облучения на размер зерен и механические свойства тонкопленочного алюминия // *Изв. РАН. МТТ*. 2024. № 1.
16. Nabbi R., Wolters J. Investigation of radiation damage in the aluminum structures of the German FRJ-2 research reactor // *International Atomic Energy Agency (IAEA)*. 1998.

17. *Khan M. et al.* A Study of the structural and surface morphology and photoluminescence of Ni-doped ALN thin films grown by co-sputtering // *Nanomaterials*. 2022. V. 12. № 21. P. 3919. <https://doi.org/10.3390/nano12213919>
18. *Lim Y.Y., Chaudhri M., Enomoto Y.* Accurate determination of the mechanical properties of thin aluminum films deposited on sapphire flats using nanoindentations // *J. Mater. Research*. 1999. V. 14. P. 2314–2327. <https://doi.org/10.1557/JMR.1999.0308>
19. *Quek S.S., et al.* The inverse Hall–Petch relation in nanocrystalline metals: A discrete dislocation dynamics analysis // *J. Mech. Phys. Solids*. 2016. V. 88. P. 252–266. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2015.12.012>
20. *Akinliwa Y., Suzuki T., Tanaka K.* Evaluation of deformation behavior in Cu thin film under tensile and fatigue loading by X-ray method // *Materials Science Forum*. 2006. V. 524–525. P. 807–812. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.524-525.807>
21. *Read D.T., Volinsky A.A.* Measurements for mechanical reliability of thin films // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. 2009. P. 337–358. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2792-4_16
22. *Sinclair G.M., Dolan T.J.* Effect of stress amplitude on statistical variability in fatigue life of 75S-T6 aluminum alloy // *Trans. ASME*. 1953. V. 75. № 5. P. 867–870. <https://doi.org/10.1115/1.4015460>
23. *Puchi-Cabrera E., et al.* Fatigue behavior of AA7075-T6 aluminum alloy coated with ZrN by PVD // *Int. J. Fatigue*. 2008. V. 30. № 7. P. 1220–1230. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.09.001>
24. *Yang H.H., et al.* Synergistic effect of environmental media and stress on the fatigue fracture behaviour of aluminium alloys // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2016. V. 39. № 10. P. 1309–1316. <https://doi.org/10.1111/ffe.12457>
25. *Ramamurty Raju P., Satyanarayana B., Ramji K.* Sample Size determination for development of S-N curve of A356.2-T6 aluminum alloy // *SDHM*. 2008. V. 4 (3). P. 161–171. <https://doi.org/10.3970/sdhm.2008.004.161>

INFLUENCE OF CYCLIC LOADING ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THIN-FILM MEMBRANE STRUCTURES

© 2024 г. N. A. Djuzhev^a, E. E. Gusev^a *,
E. O. Portnova^a, O. V. Novikova^a

^aNational Research University of Electronic Technology (MIET),
Zelenograd, Moscow, Russia

*e-mail: bubbledouble@mail.ru

Abstract — The principle of modification of mechanical properties of thin-film membrane structures of arbitrary shape by non-contact method was proposed, realized and explained for the first time. The idea was tested on an aluminum thin-film membrane formed by magnetron method on a silicon substrate. The external influence was realized by means of cyclic loading in the form of discharge and supply of excess air pressure to the membrane. As a result of repeated impacts, physical properties of materials (grain size and roughness) and mechanical properties (internal mechanical stresses and critical overpressure) are changed. Changing the magnitude of residual mechanical stresses in the membrane material allows the formation of a surface with a desired curvature value. In this work, after cyclic loading with pressure equal to half of the critical pressure, the following effects were revealed: the deflection of the membrane in the absence of external influence increased by more than an order of magnitude, the structure shifted to the plastic type of deformation, the critical rupture pressure decreased by several tens of percent. Application of this methodology allows to create new materials with unique mechanical properties.

Keywords: mechanical properties, grain size, thin films, membranes, mechanical strength, fatigue, failure, cyclic loading

REFERENCES

1. Zhang G.P., Schwaiger R., Volkert C.A., Kraft O. Effect of film thickness and grain size on fatigue-induced dislocation structures in Cu thin films // *Philosophical Magazine Letters*. 2003. V. 83. № 8. P. 477–483;
<https://doi.org/10.1080/0950083031000151383>
2. Calister W.D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7th Edition. New York, 2007.
3. Wang G., Liaw, P. *Fatigue and fracture behavior* // *Bulk metallic glasses*. Springer, Boston, 2008. P. 169–203;
https://doi.org/10.1007/978-0-387-48921-6_7
4. Pan Q. et.al. History-independent cyclic response of nanotwinned metals // *Nature*. 2017. V. 551. № 7679. P. 214–217;
<https://doi.org/10.1038/nature24266>

5. Barr C.M., Duong T., Bufford D.C. *et al.* Autonomous healing of fatigue cracks via cold welding // *Nature*. 2023; <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06223-0>
6. Zaslavsky B.V. Short course of resistance of materials. Textbook for aviation specialties of universities. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 328 p.
7. Dyuzhev N.A., Gusev E.E., Makhiboroda M.A. Study of the Mechanical Properties of thin-film membranes made of oxide and silicon nitride // *Mech. Solid*. 2022. V. 57. № 5. P. 1044–1053.
8. Perelmuter M.N. Analysis of crack resistance of material joints // *Izv. RAS. MTT*. 2020. № 4. P. 96–114; <https://doi.org/10.31857/S0572329922050063>
9. Babeshko V.A., Babeshko O.M., Evdokimova O.V. Cracks of a new type and models of some nanomaterials // *Izv. RAS. MTT*. 2020. № 5. P. 13–20.
10. Novak A.V., Novak V.R., Dedkova A.A., Gusev E.E. Dependence of Mechanical Stresses in Silicon Nitride Films on the Mode of Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition // *Semiconductors*. 2018. V. 52. № 15. P. 1953–1957; <https://doi.org/10.1134/S1063782618150095>
11. Shikunov S.L., Kurlov V.N. SiC-based composite materials obtained by siliconizing carbon matrices // *Technical Physics*. 2017. V. 62. P. 1869–1876; <https://doi.org/10.1134/S1063784217120222>
12. Bespalov V.A. *et al.* Review of methods for investigation of mechanical properties of thin films // *Model. Syst. Proc.* 2022. V. 15. № 3. P. 110–128; <https://doi.org/10.12737/2219-0767-2022-15-3-110-128>
13. Kolobov Yu.R. *et al.* Investigation of the influence of nanosecond laser pulse treatment on microstructure and fatigue resistance of technically pure titanium // *Letters in ZhTF*. 2022. V. 48. № 2. P. 15–19; <https://doi.org/10.21883/PJTF.2022.02.51913.19025>
14. Markov V.F. Technology of thin-film solid-state sensors. Textbook. 2019. 152 p.
15. Dyuzhev N.A., Gusev E.E., Portnova E.O., Makhiboroda M.A. Study of the effect of radiation exposure on the grain size and mechanical properties of thin-film aluminum // *Izv. RAS. MTT*. 2024. № 1.
16. Nabbi R., Wolters J. Investigation of radiation damage in the aluminum structures of the German FRJ-2 research reactor // *Int. Atomic Energy Agency (IAEA)*. 1998
17. Khan M. *et al.* A Study of the Structural and Surface Morphology and Photoluminescence of Ni-Doped AlN Thin Films Grown by Co-Sputtering // *Nanomaterials*. 2022. V. 12. № 21. P. 3919; <https://doi.org/10.3390/nano12213919>
18. Lim Y.Y., Chaudhri M., Enomoto Yu. Accurate determination of the mechanical properties of thin aluminum films deposited on sapphire flats using nanoindentations // *J. Mater. Res*. 1999. V. 14. P. 2314–2327; <https://doi.org/10.1557/JMR.1999.0308>
19. Quek S.S. *et al.* The inverse hall–petch relation in nanocrystalline metals: A discrete dislocation dynamics analysis // *J. Mech. Phys. Solids*. 2016. V. 88. P. 252–266; <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2015.12.012>
20. Akiniwa Y., Suzuki T., Tanaka K. Evaluation of deformation behavior in Cu thin film under tensile and fatigue loading by X-ray method // *Mater. Sci. Forum*. 2006. V. 524–525. P. 807–812; <https://doi.org/DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.524-525.807>
21. Read D.T., Volinsky A.A. Measurements for Mechanical Reliability of Thin Films // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security*. 2009. P. 337–358; https://doi.org/10.1007/978-90-481-2792-4_16

-
22. *Sinclair G.M., Dolan T.J.* Effect of stress amplitude on statistical variability in fatigue life of 75S-T6 aluminum alloy // *Trans ASME*. 1953. V. 75. P. 867–870;
<https://doi.org/10.1115/1.4015460>
 23. *Puchicabrera E. et.al.* Fatigue behavior of AA7075-T6 aluminum alloy coated with ZrN by PVD // *Int. J. Fatigue*. 2008. V. 30. № 7. P. 1220–1230;
<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.09.001>
 24. *Yang H.H. et al.* Synergistic effect of environmental media and stress on the fatigue fracture behaviour of aluminium alloys // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2016. V. 39. P. 1309–1316;
<https://doi.org/10.1111/ffe.12457>
 25. *Ramamurty Raju P., Satyanarayana B., Ramji K.* Sample Size Determination for Development of S-N Curve of A356.2-T6 Aluminum Alloy // *SDHM*. 2008. V. 4. № 3. P. 161–171;
<https://doi.org/10.3970/sdhm.2008.004.161>