

УДК 62-233.3/.9

DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-5-12

**Д. И. ЧЕРНЯВСКИЙ**  
**Д. Д. ЧЕРНЯВСКИЙ**Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ТОРСИОННОЙ ПОДВЕСКИ МИКРОЗЕРКАЛА (МЕОМС)

В работе рассматривается прочностной расчет торсионной подвески микрозеркала с отражающим слоем высокого оптического качества поверхности для отклонения отраженного лазерного луча. За счет изменения угла наклона микрозеркала лазерный луч попадает в различные входные каналы оптического датчика. При этом формируется управляющий сигнал для дальнейшей работы микросхемы. Таким образом, микрозеркало выполняет функцию коммутатора входных оптических каналов, соединяя в различные комбинации определенные входные или выходные элементы микросхемы для последующей обработки.

В работе проведен расчет прочностных параметров механической конструкции микрозеркала, изготовленного из различных материалов. Приведены практические рекомендации, связанные с разработкой торсионной подвески микрозеркала.

**Ключевые слова:** микротехнологии, микроэлектромеханические системы (MEMS), микрооптоэлектромеханические устройства (МОEMS), теория подобия, расчет на прочность торсиона, электростатический привод микрозеркала, кинематика, механическая прочность.

**Введение.** В современной микроэлектронике одним из интенсивно развивающихся направлений являются микрооптические электронные механические системы. Так называемые МОЭМС являются основным элементом современных дисплеев, адаптивной оптики, оптических микрокоммутаторов для процессоров компьютеров, быстродействующих сканеров для исследования роговой оболочки глаза с целью диагностики болезней и идентификации личности, а также для других целей.

Среди значительного количества исследований, посвященных различным аспектам производства и функционирования МОЭМС, необходимо выделить следующие основные публикации: С. Сысоева [1] представляет обзор современных электронных технологий для МОЭМС-дисплеев и проекторов, основанных на применении сканирующих микрозеркал различной конструкции. Р. А. Richard и др. [2] рассматривают технологии получения 3-D конструкций за счет их самосборки путем применения

энергии поверхностного натяжения микрокапель специальной жидкости. Niklaus F. и др. [3] делают обзор публикаций о перспективах развития сканирующих матриц, которые применяются как датчики в приборах ночного видения, пожарных и охранных сигнализациях, а также и в других устройствах. Armenise M. N. и др. [4] проводят обзор различных технологий изготовления гироскопов. Значительное внимание уделяется проектированию подвески MEMS-гироскопов. Lapisa M. и др. в работе [5] предлагают новые материалы для изготовления MEMS-систем.

Э. Г. Косцов [6] показывает историю развития и перспективы применения MEMS, рассматривают физические особенности разработки и применения MEMS-технологий, выявляют основные проблемы материаловедения для MEMS, а также основные конструктивные схемы и принципы работы микромашин. А. Б. Мигранов в работе [7] определяет вопросы, связанные с проектированием микро-

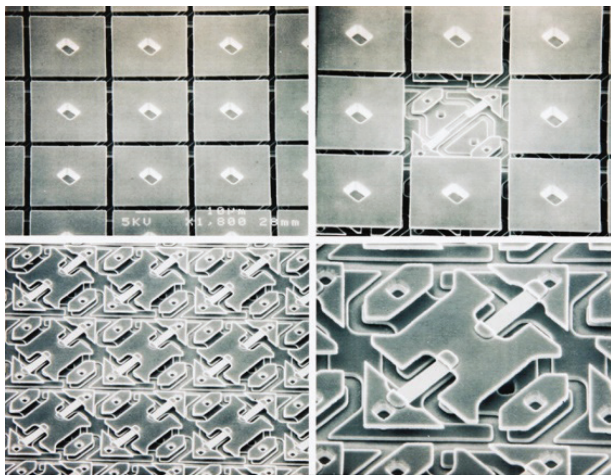


Рис. 1. Устаревший вариант матрицы микросканера [16]

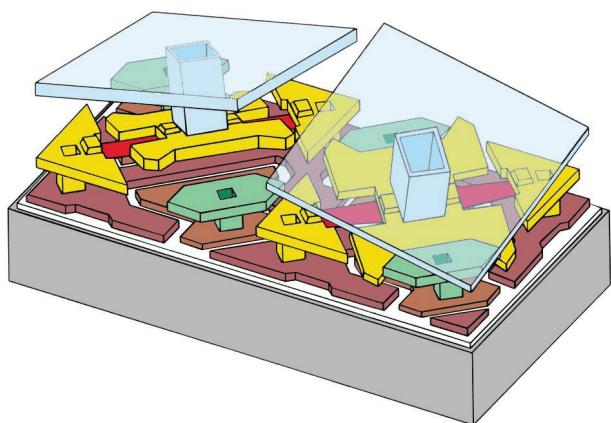
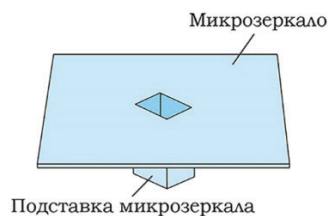


Рис. 2. Два микрозеркала на кристалле кремния. Одно в «черном» положении (нет сигнала), другое — в «белом» (есть сигнал). Среднее — «горизонтальное» — положение зеркала занимают только в припаркованном состоянии, когда сканер выключен [17]

электромеханических систем (MEMS), и проблемы, возникающие при их промышленном изготовлении. Особое внимание уделено микромеханизмам роботов, которые были разработаны методами полунатурного моделирования с использованием виртуальной среды проектирования, тестирования и отладки MEMS. Д. И. Чернявский и др. в работах [8, 9] рассматривают возможность применения механического удара и теории подобия в нанотехнологиях.

Анализ библиографии показал, что при проектировании механизмов MEOMS часто применяют биметаллический привод, а также используют торсионы для подвески микрозеркал. Lin Y. и др. [10] проводят анализ конструкции биметаллического привода микрозеркал на кремниевой подложке с применением биметаллической конструкции на основе Al и  $Al_2O_3$ . Wang D. и др. [11] рассматривают биметаллический электротермический привод микрозеркала на основе Cu-W. В диссертации [12] Евстафьев С. С. рассматривает задачи проектирования микрозеркал с применением тепловых микромеханических актюаторов на основе биметаллов. Urey H. [13] предлагает конструкцию микрозеркала на основе кремния в которой изменение угла отражения лазерного луча осуществляется не только за счет кручения торсиона



Кончики площадки, упирающиеся в основание при наклоне

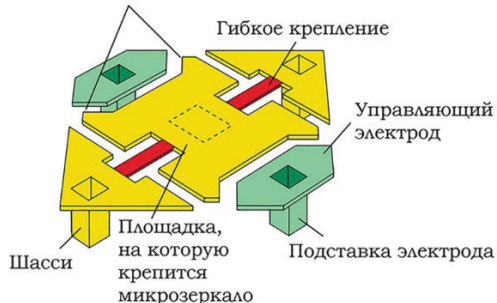


Рис. 3. Эскиз конструкции микрозеркала [17]

крепления микрозеркала к кремниевой подложке, но и за счет деформации плоскости самого микрозеркала. Zhang X. M. и др. в публикации [14] описывают статические характеристики торсионного микрозеркала с электростатическим приводом на основе конденсатора с параллельными пластинами, а также определяют зависимость между углом поворота микрозеркала и напряжением на пластинках конденсатора. Jung L. W. и др. в работе [15] предлагают расчеты и конструкцию микрозеркала с тремя степенями свободы.

Таким образом, можно отметить, что разработка микрооптических электронных механических систем (MEOMS) является важным направлением развития технологий MEMS.

**Постановка задачи.** Одним из направлений развития MEMS является разработка микросканеров (MEOMS — зеркал), которые представляют собой микроразмерные зеркала. Такие зеркала производятся на кристалле и активируются электростатическими, пьезоэлектрическими, тепловыми или электромагнитными средствами. Зеркала предназначены для изменения направления или сканирования светового луча (рис. 1) [16]. Конструкции и технологии изготовления таких микросканеров не рекламируются. Однако в библиографических источниках приводятся принципиальные схемы функционирования некоторых зеркал микросканеров (рис. 2, 3) [17].

Изучение библиографии показало, что основная масса публикаций посвящена разработке конструкции микрозеркала, технологии его изготовления, а также расчету магнитоэлектрических характери-

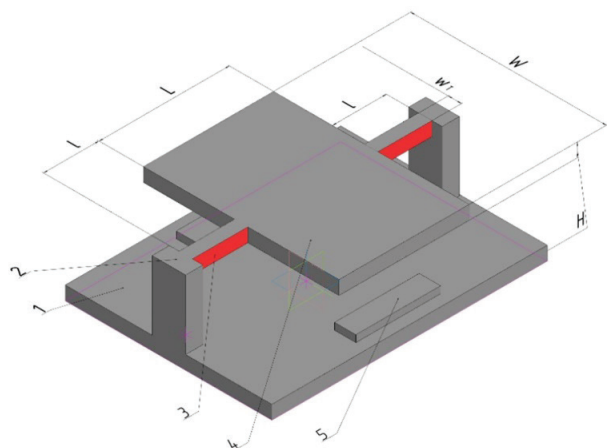


Рис. 4. Расчетная схема конструкции микрозеркала

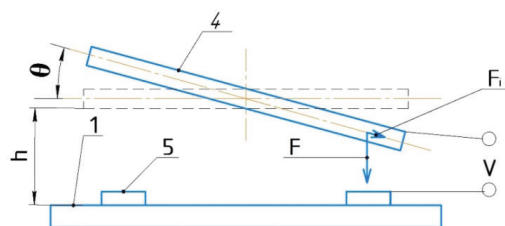


Рис. 5. Расчетная схема конструкции микрозеркала (профильный вид)

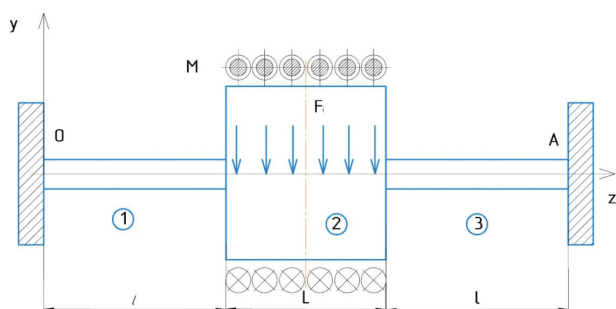


Рис. 6. Схема конструкции микрозеркала для расчета на прочность

стик системы микрозеркал. Статьи, описывающие значительно упрощенные прочностные расчеты МЕОМС, встречаются редко.

В конструкции устройства, приведенного на рис. 1–3, наклон микрозеркала осуществляется под действием электростатического поля, подаваемого на один из электродов. В результате действия кулоновских сил между управляющим электродом и электродом, установленным на нижней плоскости микрозеркала, происходит наклон зеркала. В результате площадка крепления микрозеркала наклоняется, закручивая при этом гибкое крепление (торсион), соединяющее площадку и шасси. В данном варианте торсион находится в сложном напряженном состоянии под действием нескольких нагрузок: кручение, изгиб и растяжение. В связи с особенностями технологии изготовления микрозеркала, торсион имеет вид стержня в форме параллелепипеда вместо оптимального варианта стержня в форме цилиндра. Концы торсиона жестко защемлены в шасси вместо варианта с использованием

подшипников скольжения. Рабочая частота поворота микрозеркала на основании рекламных материалов сети Интернет для цифрового матричного модуля микрозеркал DLP4500NIR (Texas Instruments) составляет 120 Гц.

Так как один из силовых электродов находится на нижней плоскости зеркала, подстилающий слой зеркальной поверхности испытывает напряжения. Примем допущение о том, что жесткость конструкции самого микрозеркала значительно больше, чем жесткость торсиона, поэтому все деформации возникают только в торсионе. Данное допущение позволяет не производить прочностной расчет оболочки самого микрозеркала, а сосредоточиться только на расчете торсиона, т.е. на расчете закрепленного сложно нагруженного стержня.

**Теория.** Для проведения прочностных расчетов конструкции микрозеркала, приведенной на рис. 1–3, построим расчетную схему (рис. 4–6).

На рис. 4–5 приведены следующие обозначения: 1 — основание кристалла, 2 — шасси (опоры), 3 — торсионы, 4 — микрозеркало, 5 — силовые электроды,  $W$  — ширина микрозеркала,  $L$  — длина микрозеркала,  $H$  — толщина микрозеркала и торсионов,  $l$  — длина торсионов,  $W_T$  — ширина торсионов,  $V$  — электрическое напряжение, подаваемое на электроды основания и микрозеркала,  $h$  — высота расположения микрозеркала над основанием,  $\theta$  — рабочий угол наклона микрозеркала,  $F$  — сила, действующая со стороны электродов на микрозеркало при подаче напряжения  $V$ ,  $F_i$  — проекция силы  $F$  на продольную ось микрозеркала. Сила  $F_i$  вызывает прогиб торсионов.

На рис. 6 приведена схема расчета торсионов на прочность. Брус переменного прямоугольного сечения неподвижно закреплен в опорах в точках  $O$  и  $A$ . На среднюю утолщенную зону бруса действует распределенный крутящий момент  $M$ . Окружность с сечением показывает направление вращения бруса «на нас», окружность с крестиком — направление вращения бруса «от нас». Распределенная сила  $F_i$  вызывает прогиб бруса. На схеме расположена пространственная декартова система координат, в которой ось  $z$  совпадает с продольной осью бруса, а направление оси  $y$  совпадает с направлением плоскости микрозеркала. Ось  $x$  на данном рисунке проецируется в начале координат  $O$  в точку. Электростатическая сила  $F$  действует по всей площади электрода. Для упрощения расчетов заменим рассредоточенную по площади электрода силу  $F$  на сосредоточенную силу  $dF$ , распределенную вдоль середины электрода. Примем, что точка приложения силы  $dF$  находится на расстоянии три четверти от оси продольной симметрии микрозеркала. Тогда величина распределенного по длине  $L$  крутящего момента  $m$ , а также распределенная изгибающая сила  $dF_i$  будут определяться выражениями:

$$dm = dF \frac{W}{2} \frac{3}{4} = \frac{3dFW}{8}. \quad (1)$$

$$dF_i = dF \sin \theta. \quad (2)$$

В большинстве случаев торсион имеет форму цилиндра. Это вызвано тем, что все поперечные сечения круглого стержня остаются плоскими и поворачиваются под действием нагрузки как единое жесткое целое. Поэтому в поперечных сечениях возникают только касательные напряжения.

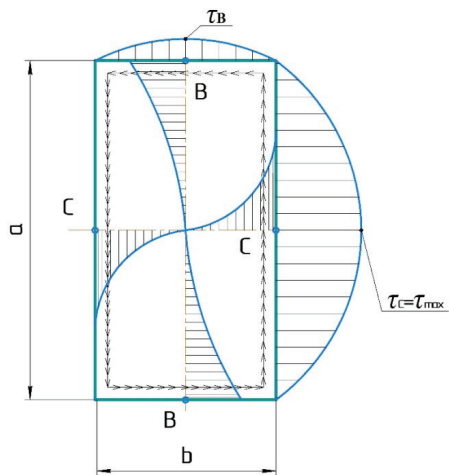


Рис. 7. Эпюра касательных напряжений для бруса прямоугольного сечения [18]. Длинная сторона прямоугольника — а, короткая сторона прямоугольника — b

Однако для некруглого сечения гипотеза плоских сечений не работает. На рис. 7 приведена эпюра касательных напряжений для бруса прямоугольного сечения [18–20]. В углах бруса напряжения равны нулю, а наибольшие напряжения возникают по серединам больших сторон в точках С.

В работе [18] приведены выражения (3–5) для расчета касательных напряжений  $\tau$  в точках В и С, а также величины угловых перемещений торсиона  $\phi$ .

$$\tau_C = \tau_{\max} = \frac{M}{\alpha ab^2} \quad (3)$$

$$\tau_B = \eta \tau_{\max} = \frac{\eta M}{\alpha ab^2} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{Mz}{G\beta ab^3} \quad (5)$$

Значения эмпирических коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\eta$  приведены в табл. 1. Величина  $G$  — модуль упругости второго рода (модуль сдвига).

Для удобства последующей работы построим эмпирическую зависимость для величин, приведенных в табл. 1. В качестве независимой переменной выберем величину —  $a/b$ . Используя известные математические методы, получим следующие выражения для данных табл. 1.

$$\alpha = 0,037 \ln\left(\frac{a}{b} - 0,487\right) + 0,232 \quad (6)$$

$$\beta = 0,044 \ln\left(\frac{a}{b} - 0,849\right) + 0,223 \quad (7)$$

$$\eta = 0,268 \ln\left(\frac{a}{b}\right)^{-2,103} + 0,735 \quad (8)$$

Для расчета торсиона на прочность необходимо рассчитать эпюры крутящих моментов и напряжений для каждого сечения торсиона, а также определить углы поворота для расчетной схемы, приведенной на рис. 6. Данная схема является статически неопределимой. Поэтому для раскрытия статической неопределимости необходимо отбросить левую заделку торсиона в точке О и ее воздействие заменяем моментом, действующим в точке О —  $M_0$ . Величина момента  $M_0$  выводится из условия, что угол поворота сечения торсиона в точке А равен нулю. Угол поворота сечения торсиона в точке А определяется как алгебраическая сумма взаимных углов поворота торцевых сечений торсиона на участках 1, 2 и 3, рис. 8. Исходя из этого условия, определим величину момента  $M_0$ .

$$M_0 = \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} \cdot dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L \quad (9)$$

$$\beta_{1,3} = 0,044 \ln\left(\frac{H}{W_T} - 0,849\right) + 0,223 \quad (10)$$

$$\beta_2 = 0,044 \ln\left(\frac{W}{H} - 0,849\right) + 0,223 \quad (11)$$

С учетом выражений (9–11) определим характерные точки для эпюр моментов, касательных напряжений и углов поворота сечений конструкции микрзеркала.

1. Характерные точки для построения эпюр моментов.

$$M(z=0) = \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} \cdot dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L \quad (12)$$

$$M(z=l) = \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} \cdot dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L \quad (13)$$

Таблица 1

Эмпирические величины коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\eta$  [18]

a/b	$\alpha$	$\beta$	$\eta$	a/b	$\alpha$	$\beta$	$\eta$
1	0,208	0,141	1,00	4	0,282	0,281	0,745
1,5	0,231	0,196	0,859	6	0,299	0,299	0,743
1,75	0,239	0,214	0,82	8	0,307	0,307	0,742
2	0,246	0,229	0,795	10	0,313	0,313	0,742
2,5	0,258	0,249	0,766	$\infty$	0,333	0,333	0,742
3	0,267	0,263	0,753				

$$M(z = l + L) = \left[ \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} - 1 \right] \cdot dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L. \quad (14)$$

$$M(z = l + L + l) = \left[ \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} - 1 \right] \cdot dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L = M_A. \quad (15)$$

2. Характерные точки для построения эпюр касательных напряжений.

Зона 1.

$$\tau_{\max}(z = 0) = \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} \times \frac{dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L}{\left[ 0,037 \ln\left(\frac{H}{W_T} - 0,487\right) + 0,232 \right] HW_T^2}. \quad (16)$$

$$\tau_{\max}(z = l) = \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} \times \frac{dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L}{\left[ 0,037 \ln\left(\frac{H}{W_T} - 0,487\right) + 0,232 \right] + 0,232 HW_T^2}. \quad (17)$$

Зона 2.

$$\tau_{\max}(z = l) = \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} \times \frac{dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L}{\left[ 0,037 \ln\left(\frac{W}{H} - 0,487\right) + 0,232 \right] WH^2}. \quad (18)$$

$$\tau_{\max}(z = l + L) = \left[ \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} - 1 \right] \times \frac{dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L}{\left[ 0,037 \ln\left(\frac{W}{H} - 0,487\right) + 0,232 \right] WH^2}. \quad (19)$$

Зона 3.

$$\tau_{\max}(z = l + L) = \left[ \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} - 1 \right] \times \frac{dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L}{\left[ 0,037 \ln\left(\frac{H}{W_T} - 0,487\right) + 0,232 \right] HW_T^2}. \quad (20)$$

$$\tau_{\max}(z = l + L + l) = \left[ \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} - 1 \right] \times \frac{dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L}{\left[ 0,037 \ln\left(\frac{H}{W_T} - 0,487\right) + 0,232 \right] HW_T^2}. \quad (21)$$

3. Характерные точки для построения эпюр углов поворота сечений.

$$\phi(z = 0) = 0. \quad (22)$$

$$\phi(z = l) = \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} \times \frac{dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L \cdot l}{G \left[ 0,044 \ln\left(\frac{H}{W_T} - 0,849\right) + 0,223 \right] HW_T^3}. \quad (23)$$

$$\phi(z = l + L) = \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} \times \frac{dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L \cdot l}{G \left[ 0,044 \ln\left(\frac{H}{W_T} - 0,849\right) + 0,223 \right] HW_T^3} + \left[ \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} - 1 \right] \times \frac{dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L \cdot L}{G \left[ 0,044 \ln\left(\frac{W}{H} - 0,849\right) + 0,223 \right] WH^3}. \quad (24)$$

$$\phi(z = 2l + L) = \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} \times \frac{dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L \cdot l}{G \left[ 0,044 \ln\left(\frac{H}{W_T} - 0,849\right) + 0,223 \right] HW_T^3} + \left[ \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} - 1 \right] \times \frac{dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L \cdot L}{G \left[ 0,044 \ln\left(\frac{W}{H} - 0,849\right) + 0,223 \right] WH^3} + \left[ \frac{I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2I\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} - 1 \right] \times \frac{dF \cos(\theta) \frac{3W}{8} L \cdot l}{G \left[ 0,044 \ln\left(\frac{H}{W_T} - 0,849\right) + 0,223 \right] HW_T^3} = 0. \quad (25)$$

В процессе работы торсионы и зеркало испытывают также напряжения изгиба от действия нагрузки  $dFi$ . Как указано в работах [13–15], максимальный угол поворота микрозеркала рассматриваемой конструкции  $\theta$  на практике не превышает  $15^\circ - 20^\circ$ . Таким образом, на предельных углах поворота микрозеркала сила  $dFi$  меньше в 3–4 раза крутящей силы  $dF$ . Поэтому примем допущение, что основным напряженным состоянием торсиона является кручение.

**Техническая реализация гипотезы.** Проведем расчет на прочность конструкции, представленной на рис. 4, 5. Необходимые конструкционные размеры примем по аналогии с размерами экспериментальной установки в работе [13] —  $l = 65$  мкм,

## Физические характеристики материалов

	Модуль Юнга (E), Па	Модуль сдвига (G), Па	Коэффициент Пуассона	Допустимые касательные напряжения $[\tau]$ , Па
Кремний	$189 \cdot 10^9$	$74,64 \cdot 10^9$	0,266	$62,5 \cdot 10^6$
Германий	$138 \cdot 10^9$	$53,99 \cdot 10^9$	0,278	$36,2 \cdot 10^6$
Арсенид галлия	$82,7 \cdot 10^9$	$31,56 \cdot 10^9$	0,31	$27,15 \cdot 10^6$
Сталь	$208 \cdot 10^9$	$80,87 \cdot 10^9$	0,286	$345,0 \cdot 10^6$

Таблица 3

## Расчет прочностных характеристик конструкции микрозеркала

	Максимальная удельная электрическая сила $dF$ , Н/μм	Момент изгибающий $M$ , Н μм	Действующие напряжения $\tau$ , МПа	Угол поворота сечения торсиона $\phi$ , ° (градус)
Зона 1, $z = 0$				
Кремний	$1,67 \cdot 10^{-8}$	$3,18 \cdot 10^{-5}$	31,25	0
Германий	$9,68 \cdot 10^{-9}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$	18,1	0
Арсенид галлия	$7,26 \cdot 10^{-9}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$	13,58	0
Сталь	$9,23 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-4}$	172,5	0
Зона 1, $z = l$				
Кремний	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$3,18 \cdot 10^{-5}$	31,25	1,23
Германий	$9,69 \cdot 10^{-9}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$	18,1	0,98
Арсенид галлия	$7,26 \cdot 10^{-9}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$	13,58	1,26
Сталь	$9,23 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-4}$	172,5	6,26
Зона 2, $z = l$				
Кремний	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$3,18 \cdot 10^{-5}$	0,21	1,23
Германий	$9,69 \cdot 10^{-9}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$	0,12	0,98
Арсенид галлия	$7,26 \cdot 10^{-9}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$	0,092	1,26
Сталь	$9,23 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-4}$	1,16	6,26
Зона 2, $z = l + 0,5066L$				
Кремний	$1,68 \cdot 10^{-8}$	0	0	1,23
Германий	$9,69 \cdot 10^{-9}$	0	0	0,98
Арсенид галлия	$7,26 \cdot 10^{-9}$	0	0	1,26
Сталь	$9,23 \cdot 10^{-8}$	0	0	6,26
Зона 2, $z = l + L$				
Кремний	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$-3,09 \cdot 10^{-5}$	-0,205	1,23
Германий	$9,69 \cdot 10^{-9}$	$-1,79 \cdot 10^{-5}$	-0,119	0,98
Арсенид галлия	$7,26 \cdot 10^{-9}$	$-1,34 \cdot 10^{-5}$	-0,089	1,26
Сталь	$9,23 \cdot 10^{-8}$	$-1,707 \cdot 10^{-4}$	-1,134	6,26
Зона 3, $z = l + L$				
Кремний	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$-3,09 \cdot 10^{-5}$	-30,43	1,23
Германий	$9,69 \cdot 10^{-9}$	$-1,79 \cdot 10^{-5}$	-17,63	0,98
Арсенид галлия	$7,26 \cdot 10^{-9}$	$-1,34 \cdot 10^{-5}$	-13,22	1,26
Сталь	$9,23 \cdot 10^{-8}$	$-1,707 \cdot 10^{-4}$	-168,1	6,26
Зона 3, $z = l + L + l$				
Кремний	$1,68 \cdot 10^{-8}$	$-3,09 \cdot 10^{-5}$	-30,43	0
Германий	$9,69 \cdot 10^{-9}$	$-1,79 \cdot 10^{-5}$	-17,63	0
Арсенид галлия	$7,26 \cdot 10^{-9}$	$-1,34 \cdot 10^{-5}$	-13,22	0
Сталь	$9,23 \cdot 10^{-8}$	$-1,707 \cdot 10^{-4}$	-168,1	0

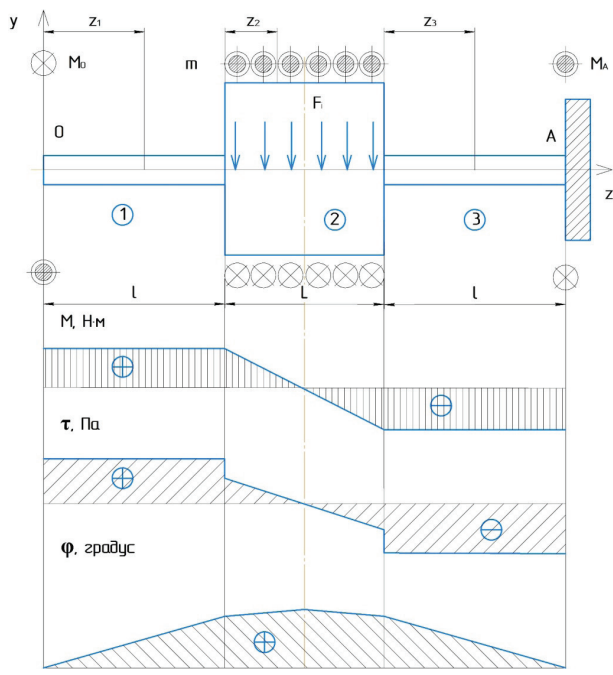


Рис. 8. Эпюры моментов, касательных напряжений и углов поворота сечений конструкции микрозеркала

$L = 100 \text{ мкм}$ ,  $W = 100 \text{ мкм}$ ,  $W_T = 1,5 \text{ мкм}$ ,  $H = 2 \text{ мкм}$ . Прочностные расчеты проведем для четырех видов материала — кремния, германия, арсенида галлия и стали. Для проведения расчетов используем прочностные характеристики материалов, которые приводит в своих рекламных материалах российская фирма «TYDEX», табл. 2. Данные получены при испытаниях физических характеристик готовых полированных компонентов.

При решении выражений (12–25) неизвестной величиной остается сила  $dF$ . Как показано в работах [13–15], величина силы  $dF$  зависит от нескольких электромагнитных факторов, которые не являются предметом рассмотрения данной статьи. Поэтому определим максимально возможное значение данной силы  $dF$  с точки зрения прочности конструктивных элементов микрозеркала. Подставив известные значения в формулы (12–15), получим выражения (26–27) при угле  $\theta = 0^\circ$ . На расстоянии  $z = 1 + 0,50662 L = 115,7 \text{ мкм}$  изгибающий момент  $M$  будет равен нулю. Преобразуем выражения (16–21) для касательных напряжений, используя допустимые напряжения  $[\tau]$ , (3–4).

$$M_0 = M(z = 0) = M(z = l) = 1,9 \cdot 10^3 dF \text{ Н}\cdot\mu\text{м}. \quad (26)$$

$$M_A = M(z = l + L) = M(z = l + L + l) = -1,85 \cdot 10^3 dF \text{ Н}\cdot\mu\text{м}. \quad (27)$$

Зона 1.

$$dF_{\max}(z = 0) = dF_{\max}(z = l) \leq \frac{[\tau] \cdot \left[ 0,037 \ln\left(\frac{H}{W_T} - 0,487\right) + 0,232 \right] HW_T^2}{s \cdot \frac{l\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2l\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} \cdot \cos(\theta)} \frac{3W}{8} L \quad (28)$$

Зона 2.

$$dF_{\max}(z = l) \leq \frac{[\tau] \cdot \left[ 0,037 \ln\left(\frac{W}{H} - 0,487\right) + 0,232 \right] WH^2}{s \cdot \frac{l\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2l\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} \cdot \cos(\theta)} \frac{3W}{8} L \quad (29)$$

$$dF_{\max}(z = l + L) \leq \frac{[\tau] \cdot \left[ 0,037 \ln\left(\frac{W}{H} - 0,487\right) + 0,232 \right] WH^2}{s \cdot \left[ \frac{l\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2l\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} - 1 \right] \cdot \cos(\theta)} \frac{3W}{8} L \quad (30)$$

Зона 3.

$$dF_{\max}(z = l + L) = dF_{\max}(z = 2l + L) \leq \frac{[\tau] \cdot \left[ 0,037 \ln\left(\frac{H}{W_T} - 0,487\right) + 0,232 \right] HW_T^2}{s \cdot \left[ \frac{l\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3}{2l\beta_{1,3}WH^2 + L\beta_2W_T^3} - 1 \right] \cdot \cos(\theta)} \frac{3W}{8} L \quad (31)$$

где  $s$  — коэффициент безопасности ( $s = 2,0$ ).

Проведем расчет выражений (26–31) на основе данных, приведенных в табл. 3.

**Выводы и заключение.** При анализе полученных данных, представленных на рис. 8 и в табл. 3, можно сделать следующие выводы.

1. Представленная на рис. 1–3 принципиальная схема микрозеркала является работоспособной конструкцией с точки зрения теории прочности.

2. Расчеты на прочность показали, что в ходе поворота микрозеркала, такой поворот осуществляется только за счет кручения торсиона крепления основы микрозеркала к шине кремниевой подложки. Угловая деформация сечений плоскости самого микрозеркала примерно на два порядка меньше, чем аналогичный поворот поперечных сечений торсионов. Таким образом, можно считать, что в процессе поворота микрозеркала его поверхность остается плоской и не меняет своей формы. Это означает, что напряженное состояние микрозеркала в его крайних положениях при повороте не вносит дополнительных погрешностей в величину угла отражения лазерного луча в ходе работы MEOMS.

3. Рабочий угол поворота микрозеркала в первую очередь определяется прочностью материала торсиона, а не вероятными силовыми характеристиками электродов, формирующих крутящий момент для микрозеркала. Для типовых материалов, используемых в микроэлектронике, диапазон угла поворота микрозеркала с учетом коэффициента безопасности  $s = 2$ , не превышает  $1,5^\circ$ . Для более прочного нестандартного для электронной промышленности материала — стали, такой диапазон не превышает  $6,5^\circ$ .

Таким образом, можно сделать итоговый вывод о том, что предлагаемая торсионная конструкция подвески микрозеркала требует использования новых более прочных материалов для достижения стабильной работы оптического лазерного маршрутизатора с диапазоном угла поворота микрозеркала  $15^\circ$  и более.

## Библиографический список

1. Сысоева С. МОЭМС — доступные технологии генерации и сканирования оптической информации // Компоненты и технологии. 2010. № 8. С. 33–40.
2. Richard R. A., Yeatman E. M., Bright V. M. [et al.]. Surface tension-powered self-assembly of microstructures — the state-of-the-art // Journal of Microelectromechanical Systems. 2003. Vol. 12, no. 4. P. 387–417. DOI: 10.1109/JMEMS.2003.811724.
3. Niklaus F., Vieider C., Jakobsen H. MEMS-Based Uncooled Infrared Bolometer Arrays — A Review // Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering. 2008. Vol. 6838. DOI: 10.1117/12.755128.
4. Armenise M. N., Ciminelli A. C., Dell'Olio A. V. [et al.]. Advances in Gyroscope Technologies. Springer, 2010. P. 118. DOI: 10.1007/978-3-642-15494-2.
5. Lapisa M., Stemme G., Niklaus F. Wafer-Level Heterogeneous Integration for MOEMS, MEMS, and NEMS // Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2011. Vol. 17, no. 3. P. 629–644. DOI: 10.1109/JSTQE.2010.2093570.
6. Косцов Э. Г. Состояние и перспективы микро- и нанoeлектроники // Автометрия. 2009. Т. 45, № 3. С. 3–52.
7. Мигранов А. Б. Разработка методами полунатурного моделирования перспективных микроэлектромеханических систем (МЭМС) // Труды Института механики УНЦ РАН. 2006. Т. 4. С. 288–305.
8. Чернявский Д. И. Контактная прочность цилиндрических зубчатых передач для микромашин MEMS // Проблемы машиноведения: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 17–19 марта 2020 г.). Омск: Изд-во ОмГТУ, 2020. С. 156–161.
9. Chernyavskii D. I., Chernyavskaya D. D. Mechanical impact in nanotechnology // Russian Engineering Research. 2011. Vol. 31 (7). 668. DOI: 10.3103/S1068798X11070045.
10. Lin Y., Qian Y., Ma F. [et al.]. Development of stress-induced curved actuators for a tunable THz filter based on double split-ring resonators // Applied Physics Letters. 2013. Vol. 102. 111908. DOI: 10.1063/1.4798244.
11. Wang D., Zhang X., Zhou L. [et al.]. An Ultra-Fast Electrothermal Micromirror with Bimorph Actuators Made of Copper/Tungsten // 2017 International Conference on Optical MEMS and Nanophotonics (OMN). 2017. DOI: 10.1109/OMN.2017.8051478.
12. Евстафьев С. С. Разработка и исследование физико-технологических моделей многослойных тепловых макроактюаторов: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2016. 145 с.
13. Urey H. Torsional MEMS scanner design for high-resolution display systems // Proc. International Symposium on Optical Science and Technology. 2002. Vol. 4773. P. 27–37. DOI: 10.1117/12.469198.
14. Zhang X. M., Chaub F. S., Quanb C. [et al.]. A study of the static characteristics of a torsional micromirror // Sensors and Actuators. 2001. Vol. 90 (1-2). P. 73–81. DOI: 10.1016/S0924-4247(01)00453-8.
15. Jung L. W., Krishnamoorthy U., Solgaard O. High Fill-Factor Two-Axis Gimbaled Tip-Tilt-Piston Micromirror Array Actuated by Self-Aligned Vertical Electrostatic Combrives // Journal of Microelectromechanical Systems. 2006. Vol. 15, no. 3. P. 563–571. DOI: 10.1109/JMEMS.2006.876666.
16. MEMS технологии. URL: <https://mems-russia.ru/produktyi/mikroskaneryi-mems-zerkala/mikroskaneryi-mems-zerkala-pr-votayvan> (дата обращения: 01.01.2021).
17. Дрожжин А. MEMS: микроэлектромеханические системы, часть 2 / Аналитика (3dnews.ru). URL: <https://3dnews.ru/editorial/mems-mikroelektro-mehchanicheskie-sistemi-chast-2> (дата обращения: 01.01. 2021).
18. Феодосьев В. И. Сопrotивление материалов. 17-е изд., испр. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 542 с. ISBN 978-5-7038-4819-7.
19. Тимошенко С. П. Сопrotивление материалов. В 2 т. Москва: Наука, 1965.  
Т. 1. 364 с.  
Т. 2. 480 с.
20. Беляев Н. М. Сопrotивление материалов. Москва: Наука, 1976. 608 с.

**ЧЕРНЯВСКИЙ Дмитрий Иванович**, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Машиноведение».

SPIN-код: 8610-2957

AuthorID (РИНЦ): 473365

ORCID: 0000-0002-7585-433X

Author ID (SCOPUS): 6506002416

ResearcherID: N-2038-2015

**ЧЕРНЯВСКИЙ Даниил Дмитриевич**, студент гр. ФИТ-201 факультета информационных технологий и компьютерных систем.

Адрес для переписки: [dichernyavskiy@omgtu.tech](mailto:dichernyavskiy@omgtu.tech)

## Для цитирования

Чернявский Д. И., Чернявский Д. Д. Расчет на прочность торсионной подвески микрозеркала (MEMS) // Омский научный вестник. 2021. № 3 (177). С. 5–12. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-5-12.

Статья поступила в редакцию 14.04.2021 г.

© Д. И. Чернявский, Д. Д. Чернявский