

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Крупногабаритные зеркала в силовой оптике

В.Ю. Хомич, В.А. Шмаков

Обсуждаются результаты исследований по созданию крупногабаритных зеркал в силовой оптике из таких материалов, как инвар, карбид кремния, композиционный материал углерод–кремний–карбид кремния и др. Разработаны методы расчёта термических деформаций в охлаждаемых зеркалах при световой нагрузке. Предложен способ уменьшения массы зеркал, основанный на применении материалов из многослойных сотовых структур и пористых материалов.

Ключевые слова: материалы зеркал, теплообмен, термические деформации, параметры стабильности зеркал

PACS numbers: 42.79.–e, 44.10.+i

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.10.038465>

Содержание

1. Введение (263).
2. Расчёт термических деформаций в лазерных зеркалах (263).
3. Параметры термической стабильности лазерных зеркал (265).
4. Проблема снижения веса крупногабаритных зеркал (268).
5. Крупногабаритные зеркала из материалов с сотовой и пористой структурой (268).
6. Заключение (270).

Список литературы (270).

1. Введение

В последние годы всё большее внимание уделяется вопросам разработки крупногабаритных лазерных зеркал. Это связано с необходимостью создания новых лазерных комплексов различного применения, предназначенных, в частности, для:

— специальных технологий в условиях некоторых производств (резка материалов и металлоконструкций, сварка и поверхностное упрочнение);

— очистки побережий от нефтепродуктов при аварийных разливах нефти и поверхности воды от нефтяных плёнок, включая радужные, которые не поддаются эффективному уничтожению другими способами;

— дистанционной резки металла и армированных бетонных конструкций в процессе демонтажа и аварийного ремонта на атомных электростанциях, на нефтяных и газовых скважинах, а также при спасательных работах в случае природных катастроф и террористических актов, резки корпусов судов на металлом;

— обработки metallургического, химического, горнодобывающего оборудования в процессе ремонта и сборки, а также применений в специальной технике.

Лазерные зеркала в зависимости от условий их работы могут подвергаться механическим и тепловым нагрузкам различного рода. Поглощение даже малой части светового потока может вызвать в зеркалах термические деформации, приводящие к существенному изменению формы оптической поверхности и в конечном счёте к искажению волнового фронта генерируемого излучения. Здесь возникает необходимость подбора материала зеркал и решения задач их термостатирования, т.е. создания в зеркалах эффективной системы охлаждения.

В настоящей статье показано, что термическая стабильность охлаждаемых зеркал существенно зависит от теплопроводности, коэффициента термического расширения и теплоёмкости материала зеркал, в значительной мере определяющих их оптическую работоспособность. Изучена возможность создания охлаждаемых крупногабаритных зеркал из таких материалов, как инвар, карбид кремния и композиционный материал углерод–кремний–карбид кремния. Предложен способ уменьшения массы крупногабаритных зеркал, основанный на применении многослойных сотовых и пористых структур. Это позволяет значительно снизить вес зеркала и время его термостабилизации.

2. Расчёт термических деформаций в лазерных зеркалах

Определение термических деформаций в крупногабаритных зеркалах связано с решением пространственной задачи термоупругости для тела конечных размеров. Известные решения для полубесконечных тел в данном случае оказываются некорректными, поскольку здесь существенную роль играют граничные условия на боковых поверхностях. Реальным способом решения такой задачи может быть выбор удачной модели, которая позволяет учесть основные факторы, влияющие на

В.Ю. Хомич. Институт электрофизики и электротехники РАН, Дворцовая наб. 18, 191186 С.-Петербург, Российская Федерация
E-mail: Khomich@ras.ru

В.А. Шмаков. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: shmakov@kapella.gpi.ru

Статья поступила 18 января 2018 г.

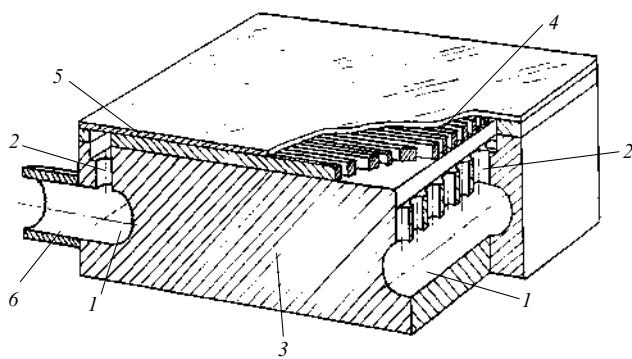


Рис. 1. Охлаждаемое лазерное зеркало: 1 и 2 — коллекционная система подвода и отвода теплоносителя, 3 — силовая основа зеркала, 4 — теплообменник канального типа со щелевидными каналами, 5 — отражающая пластина, 6 — штифты.

термические деформации зеркал. В настоящей статье выбрана модель толстой пластины.

Представим зеркало в виде многослойной пластины, составленной из различных изотропных материалов. Схематически такое зеркало показано на рис. 1. Для наглядности выбрана прямоугольная форма. Отражающая пластина, теплообменник и силовая основа зеркала, приведенные на рисунке, в совокупности представляют собой трёхслойную пластину. Предполагается, что слои прочно соединены по поверхностям контакта, так что при деформировании проскальзывания между ними не происходит и многослойная пластина ведёт себя как единое целое.

В рамках выбранной модели при расчёте термоупругих деформаций к деформациям изгиба добавляются деформации теплового расширения, нормального к нейтральной поверхности. Такая модель позволяет рассматривать неоднородную структуру зеркала в различных слоях и рассчитывать конструкции с различными комбинациями материалов. Взаимодействие слоёв здесь учитывается с помощью приведённого коэффициента попечного сжатия $\tilde{\nu}$ (приведённого коэффициента Пуассона), который определяется геометрией и материалом слоёв.

Между граничными поверхностями многослойной пластины существует нейтральная поверхность, которая при чистом изгибе не деформируется. Принимаются гипотезы Кирхгофа — Лява, в соответствии с которыми нормальные к нейтральной поверхности элементы (прямолинейные волокна пластины) остаются прямолинейными и нормальными к деформированной нейтральной поверхности, не изменяя своей длины. Предполагается также, что нормальными напряжениями на площадках, параллельных нейтральной поверхности пластины, можно пренебречь ввиду их малости по сравнению с другими напряжениями. Кроме того, считается, что температурное поле не вызывает значительных усилий на изгиб в нейтральной поверхности пластины (пренебрегается влиянием растяжения на изгиб нейтральной поверхности).

Перемещения отражающей поверхности зеркала при тепловой нагрузке в соответствии с выбранной моделью можно определить как сумму изгибных перемещений W_{bend} и теплового расширения W_{exp} , нормального к нейтральной поверхности,

$$W = W_{\text{bend}} + W_{\text{exp}}.$$

Перемещения, соответствующие неравномерному тепловому расширению W_{exp} , можно выразить как разность перемещений точек оптической и нейтральной поверхности

$$W_{\text{exp}} = \int_0^{z_0} T(z) \beta(z) dz,$$

где $\beta(z)$ — коэффициент линейного расширения, z_0 — расстояние между отражающей и нейтральной поверхностями, которое находится из условия

$$\int_{z_0-H}^{z_0} Ez dz = 0.$$

Здесь H — толщина зеркала, E — модуль Юнга.

Значение изгибной составляющей перемещения оптической поверхности определяется из решения уравнения изгиба

$$\nabla^4 W_{\text{bend}} = -\nabla^2 M_T D, \quad (1)$$

M_T — температурный момент,

$$M_T = \int_{z_0-H}^{z_0} \frac{E\beta z}{1-\tilde{\nu}} T(r, t) dz,$$

D — приведённая жёсткость пластины на изгиб,

$$D = \int_{z_0-H}^{z_0} \frac{E(\tilde{\nu}-\nu)}{1-\tilde{\nu}^2} dz,$$

а приведённый коэффициент Пуассона $\tilde{\nu}$ находится из условия

$$\int_{z_0-H}^{z_0} \frac{E(\tilde{\nu}-\nu)}{1-\tilde{\nu}^2} dz = 0.$$

При осесимметричной задаче граничные условия для свободно опёртой круговой пластины радиусом R имеют вид

$$\begin{cases} W_{\text{bend}}(r) = 0, \\ \nabla^2 W_{\text{bend}}(r) + \frac{\nu-1}{r} \frac{dW_{\text{bend}}(r)}{dr} = -\frac{M_T}{D} \quad \text{при } r=R. \end{cases} \quad (2)$$

Уравнение (1) и граничные условия (2) не содержат инерционных членов, т.е. рассматривается задача о термоупругих перемещениях оптической поверхности в квазистационарном приближении. В этом приближении считается, что деформации и напряжения устанавливаются значительно быстрее, чем температура, поэтому нестационарность учитывается только в уравнении теплопроводности.

Решение уравнения (1) будем искать в виде

$$W_{\text{bend}} = C_1(r^2 - R^2) + \sum_{k=1}^{\infty} W_k \frac{J_0(\beta_k r/R) \sqrt{2}}{R J_1(\beta_k)}, \quad (3)$$

где J_0 и J_1 — функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядка соответственно, β_k — корни уравнения $J_0(\beta_k) = 0$. Первое слагаемое в (3) представляет собой решение уравнения (1) при постоянном вдоль радиуса тепловом потоке, второе слагаемое учитывает неравномерность этого потока.

Разложим далее температурную нагрузку M_T/D в ряд:

$$\frac{M_T}{D} = \sum_{m=0}^{\infty} \theta_m \frac{J_0(\alpha_m r/R) \sqrt{2}}{R J_0(\alpha_m)}. \quad (4)$$

Здесь α_m — корни уравнения $J_1(\alpha_m) = 0$.

Учитывая, что

$$\nabla^2 J_0\left(\frac{\beta_k r}{R}\right) = -\left(\frac{\beta_k}{R}\right)^2 J_0\left(\frac{\beta_k r}{R}\right),$$

получим

$$\nabla^4 W_{\text{bend}} = \sum_{k=1}^{\infty} W_k \frac{J_0(\beta_k r/R) \sqrt{2}}{R J_1(\beta_k)} \left(\frac{\beta_k}{R}\right)^4. \quad (5)$$

Разложим также функцию $J_0(\alpha_m r/R)$ в ряд Фурье:

$$\begin{aligned} J_0\left(\frac{\alpha_m r}{R}\right) &= \sum_{k=1}^{\infty} C_k \frac{J_0(\beta_k r/R) \sqrt{2}}{R J_1(\beta_k)} = \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 J_0(\beta_k r/R)}{J_1(\beta_k)(\beta_k^2 - \alpha_m^2)} \beta_k J_0(\alpha_m), \\ C_k &= \int_0^R J_0\left(\frac{\alpha_m r}{R}\right) r J_0\left(\frac{\beta_k r}{R}\right) dr = \frac{R \beta_k}{\alpha_m^2 - \beta_k^2} J_0(\alpha_m) J_1(\beta_k). \end{aligned}$$

Тогда температурную нагрузку (4) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{M_T}{D} &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \theta_m \frac{2\sqrt{2} J_0(\beta_k r/R) \beta_k J_0(\alpha_m)}{R J_0(\alpha_m) J_1(\beta_k)(\beta_k^2 - \alpha_m^2)} = \\ &= \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \chi_{mk} \frac{\sqrt{2} J_0(\beta_k r/R)}{R J_1(\beta_k)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь введено обозначение $\chi_{mk} = \theta_m 2\beta_k / (\beta_k^2 - \alpha_m^2)$. Далее из (6) находим

$$-\nabla_r^2 \frac{M_T}{D} = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \chi_{mk} \frac{\sqrt{2} J_0(\beta_k r/R)}{R J_1(\beta_k)} \left(\frac{\beta_k}{R}\right)^2 \quad (7)$$

и, сопоставляя (5) с (7), получаем

$$W_k = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\chi_{mk}}{(\beta_k/R)^2}. \quad (8)$$

Теперь, учитывая (8) и граничные условия (2), можно определить константу C_1 в уравнении (3):

$$C_1 = \frac{v-1}{2(1+v)} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \chi_{mk} \frac{\sqrt{2}}{R \beta_k}.$$

Окончательно для W_{bend} получим:

$$\begin{aligned} W_{\text{bend}} &= \frac{v-1}{2(1+v)} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \chi_{mk} \frac{\sqrt{2}(r^2 - R^2)}{R \beta_k} + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\chi_{mk}}{(\beta_k/R)^2} \frac{\sqrt{2} J_0(\beta_k r/R)}{R J_1(\beta_k)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Таблица 1. Значения температуры и перемещений оптической поверхности охлаждаемого зеркала из меди

Координата границы между слоями	$t = 0,01$ с	$t = 0,55$ с	$t = 1,9$ с	$t = 3,73$ с	$t = 6,2$ с	$t = 28$ с
0 (оптическая поверхность)	0,31	1,68	1,85	1,93	1,97	2,07
1 мм (под отражающей пластиной)	0,11	1,30	1,46	1,54	1,57	1,68
3,5 мм (под теплообменником)	0,001	0,43	0,62	0,71	0,76	0,89
65 мм (тыльная сторона)	0	0	0	0,01	0,06	0,42
Перемещения оптической поверхности, мкм	0,04	0,71	1,19	1,43	1,51	1,26

Таким образом, при известном распределении температуры в зеркале можно определить отклонение его отражающей поверхности от начального состояния. В реальном охлаждаемом зеркале размеры зоны охлаждения (как правило, с высокими перепадами температур) малы по сравнению с размерами всего зеркала. Решение задач по определению температурных полей с постановкой граничных условий на всей поверхности зеркала, включая смачиваемые поверхности каналов охлаждения, классическими методами весьма затруднительно.

Здесь, как и при расчёте термических деформаций, определение температурного поля основано на моделировании охлаждаемого зеркала многослойной пластиной. При этом один или несколько слоёв заменяются сплошной средой с приведёнными теплофизическими характеристиками, а теплообменники представляются стоками тепла с распределёнными объёмными коэффициентами теплоотдачи. Такая модель позволяет учитывать неоднородность структуры зеркала и добиваться удовлетворительного совпадения результатов расчёта температурных полей с экспериментальными данными. Методика расчёта температурных полей для указанного случая представлена в работе [1].

В таблице 1 приведены значения температуры и перемещений оптической поверхности охлаждаемого зеркала из меди диаметром 350 мм при постоянном тепловом потоке 10 Вт см^{-2} на оптической поверхности. Толщина зеркала $H = 65$ мм, толщина отражающей пластины $h = 1$ мм, толщина слоя охлаждения 2,5 мм, ширина канала в теплообменнике $l = 0,6$ мм, толщина ребра $\delta = 0,9$ мм, принято значение коэффициента теплоотдачи $\alpha = 1,5$ Вт см^{-2} град $^{-1}$, теплопроводность $\lambda_r = \lambda_z = 1,3$ Вт см^{-2} град $^{-1}$.

Как показывают результаты расчёта, время установления стационарного режима работы такого зеркала может быть большим (здесь оно составляет около 30 с). Для более быстрого установления стационарного режима (уменьшения времени термостабилизации зеркала) необходимо применение конструкций, принципиально отличающихся от традиционных. Кроме известных теплообменников в таких зеркалах необходимо предусматривать систему термостабилизации их силовой основы. В полной мере это относится и к другим формам термического воздействия (изменение температуры среды, влияние солнца или ветра и др.).

3. Параметры термической стабильности лазерных зеркал

Параметры термической стабильности лазерных зеркал были введены и рассматривались для непрерывного и

импульсно-периодического режимов работы в начале исследований по силовой оптике [2, 3].

Одним из основных требований, предъявляемых к материалам крупногабаритных зеркал, является сохранение их оптических характеристик. Оценка обычно ведётся по таким параметрам, как коэффициент отражения, комплексный показатель преломления, коэффициент термического расширения, плотность, теплопроводность, удельная теплоёмкость, температура плавления [4].

Не менее важными характеристиками являются также:

- механические — модуль упругости, предел прочности, предел текучести, микротвёрдость;
- металлографические — кристаллическая структура, величина зерна, температура рекристаллизации, температура снятия напряжения, наличие второй фазы, пор, примесей;
- технологические — определяющие возможность механической обработки, полировки, нанесения покрытий.

Недостатком обычно применяемых зеркал в современной крупногабаритной оптике из меди, стеклокерамики, плавленого кварца, ситалла и др. является их высокий коэффициент термического расширения или низкая теплопроводность. Такие зеркала не могут эффективно использоваться при интенсивных световых потоках и быстром изменении температуры внешней среды.

Термическая стабильность зеркал в зависимости от световой нагрузки определяется рядом параметров. По признаку достижения на отражающей поверхности критической температуры для непрерывного и импульсного режимов работы лазера параметры стабильности имеют вид соответственно

$$\max \{ \lambda T \}, \quad \max \{ \sqrt{\lambda c \rho} T_{\text{cr}} \},$$

c — удельная теплоёмкость, λ — коэффициент теплопроводности, ρ — плотность материала. Критическая температура T_{cr} для конкретного материала имеет свой физический смысл: температура плавления, начала процесса рекристаллизации, фазовых переходов и т.п. Здесь и далее "max" означает максимально допустимое значение данного параметра для выбранного материала, при котором ещё сохраняется оптическая работоспособность зеркала.

Часть излучения, поглощённого оптической поверхностью, превращаясь в тепло, создаёт в материале тепловые потоки. Возникающее в лазерном зеркале неоднородное распределение температуры приводит к появлению термических напряжений. Если создаваемые тепловыми потоками максимальные касательные напряжения превышают предел микротекучести материала, то происходят необратимые структурные изменения. Соответствующие параметры стабильности материала по признаку появления на оптической поверхности пластических деформаций для указанных режимов работы лазера имеют вид

$$\max \left\{ \frac{\lambda \sigma_0}{\beta E} \right\}, \quad \max \left\{ \frac{\sqrt{\lambda c \rho} \sigma_0}{\beta E} \right\},$$

где σ_0 — предел микротекучести, β — коэффициент термического расширения, E — модуль Юнга. Величины σ_0 и E следует рассматривать совместно, поскольку высокий уровень температурных напряжений

($\approx \beta E / \lambda$) может не приводить к появлению структурных изменений в материале, если предел микротекучести достаточно высок. Для хрупких материалов в качестве величины σ_0 следует рассматривать напряжение хрупкого разрушения или начала развития микротрещин. Пластичные материалы характеризуются величиной остаточной деформации, приводящей к ухудшению оптических свойств отражающей поверхности. Предельное напряжение σ_0 , которое в этом случае определяется экспериментально, составляет величину $\sigma_{0,01}$ — напряжение, вызывающее деформацию 0,01. Для импульсно-периодического режима работы лазера необходимо учитывать усталостное повреждение материала.

Термоупругое искажение отражающей поверхности зеркал считается одной из основных характеристик и в значительной мере определяет качество лазерного излучения. Параметры стабильности материала, связанные с величиной предельного искажения оптической поверхности, для непрерывного и импульсного режимов работы лазера

$$\max \left\{ \frac{\beta}{\lambda} \right\}, \quad \max \left\{ \frac{\beta}{c \rho} \right\},$$

могут быть получены на основе решения модельных задач термоупругости.

Для каждого режима работы существует наиболее "жёсткий" параметр стабильности, ограничивающий использование материалов в лазерных зеркалах. При непрерывном режиме работы к "жёстким" относятся параметр, описывающий термоупругое искажение оптической поверхности, а также параметр, ответственный за появление пластических деформаций. В импульсных лазерах — это достижение на оптической поверхности критической температуры и условий образования плазмы. По мере уменьшения длительности импульса весомую роль начинают играть параметры, описывающие плавление материала, испарение, появление приповерхностной плазмы. Если длительность импульса $\approx 10^{-9}$ с и менее, то существенными становятся динамические эффекты. В этом случае необходимо учитывать конечность скорости распространения тепла и скорость упругих волн.

Некоторые требования, предъявляемые к охлаждаемым зеркалам, могут носить взаимоисключающий характер. Рассмотрим, например, параметры стабильности, определяемые предельным тепловым потоком и предельным термическим искажением оптической поверхности. Уменьшение термических деформаций зеркал при оптимизации их конструкции связано с появлением дополнительных напряжений, препятствующих искажению оптической поверхности. Это приводит к снижению предельных тепловых потоков, при которых происходит пластическая деформация оптической поверхности. Кроме того, повышение эффективности системы охлаждения путём уменьшения размеров отдельных элементов теплообменника может приводить к снижению прочности лазерных зеркал.

Выбор параметров стабильности для зеркал лазеров непрерывного действия с развитой системой охлаждения связан с особенностями теплообмена, которые могут значительно изменить характер деформирования. Температурное поле охлаждаемого лазерного зеркала обычно сосредоточено в тонком слое, прилегающем к отражающей поверхности. Теплообмен происходит за счёт

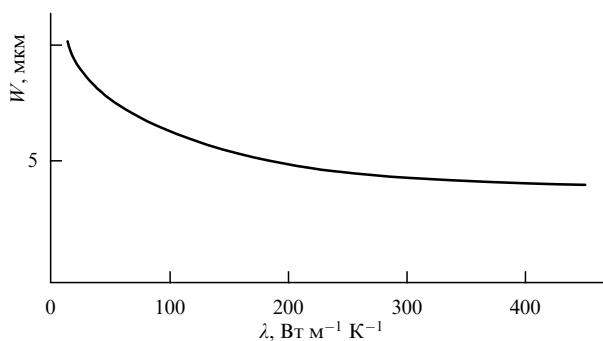


Рис. 2. Зависимость термических искажений отражающей поверхности от теплопроводности материала зеркала.

теплопереноса, а коэффициент теплопроводности играет меньшую роль, чем в неохлаждаемых зеркалах.

На рисунке 2 приведена зависимость искажений оптической поверхности от теплопроводности $W = W(\lambda)$, полученная в результате расчёта для охлаждаемого зеркала с характерным размером 500 мм при $\beta = 1,7 \times 10^{-7} \text{ К}^{-1}$ (меди). Как видно из рисунка, эта зависимость существенно отклоняется от известного закона

$$W \approx \frac{\beta}{\lambda}.$$

При теплопроводностях, превышающих 100 Вт м⁻¹ К⁻¹, W мало изменяется. Например, при увеличении λ от 100 до 400 Вт м⁻¹ К⁻¹ значение W уменьшается всего на 27 %, т.е. в этой области большую роль при выборе материала лазерных зеркал играет коэффициент термического расширения. Как покажет дальнейший анализ, не менее важную роль здесь играет также выбор теплоносителя.

Для выяснения этой зависимости рассмотрим следующую задачу. Пусть лазерное зеркало состоит из тонкой отражающей пластины толщиной h и массивной основы, между которыми расположен теплообменник. Теплофизические характеристики теплообменника описываются теплопроводностью λ_{II} , объёмным коэффициентом теплоотдачи α_v и пористостью Π . Будем считать, что тепло сосредоточено в отражающей пластине и части теплообменника, к ней прилегающей. Основа зеркала при этом остаётся теплоизолированной.

Искажения оптической поверхности в данном случае вызываются тепловым расширением отражающей пластины, в которой температура распределена линейно, и разогретой части слоя теплообменника, в которой температура распределена экспоненциально. Тогда с учётом сделанных предположений такое искажение выражается как

$$W_{\text{norm}} \approx \beta \left(\frac{1}{\alpha_v} + \frac{h}{\sqrt{\alpha_v \lambda_{II}}} + \frac{h^2}{2\lambda} \right).$$

Первое слагаемое в полученном выражении соответствует деформации слоя охлаждения, второе и третье — расширению отражающей пластины.

Воспользовавшись аналитическим решением для изгиба, можно показать, что деформации

$$W_{\text{bend}} \approx \beta \frac{h}{\sqrt{\alpha_v \lambda_{II}}}.$$

Суммарное искажение оптической поверхности

$$W = W_{\text{norm}} + W_{\text{bend}}.$$

Введём безразмерный параметр

$$k = \frac{h}{2} \sqrt{\frac{\alpha_v}{\lambda_{II}}}.$$

Коэффициент теплопроводности λ_{II} для среды теплообменника можно выразить через пористость и теплопроводность исходного материала:

$$\lambda_{II} = \lambda(1 - \Pi).$$

Тогда

$$W \approx \frac{\beta}{\alpha_v} [1 + 4k + 2k^2(1 - \Pi)]. \quad (10)$$

Коэффициент теплопроводности входит в (10) неявно через параметр k . Объёмный коэффициент теплоотдачи учитывает свойства теплоносителя и особенности конструкции теплообменника. Таким образом, параметр стабильности охлаждаемых зеркал зависит не только от коэффициента теплопроводности и термического расширения их материала. Существенными являются также особенности конструкции зеркала и характеристики теплоносителя.

Из выражения (10) следует, что если толщину отражающей пластины устремить к нулю, то параметр стабильности перестаёт зависеть от теплопроводности материала и определяется только отношением коэффициента термического расширения материала к объёмному коэффициенту теплоотдачи,

$$W \approx \frac{\beta}{\alpha_v}.$$

При больших k параметр становится пропорциональным β/λ , т.е. известному соотношению.

В таблице 2 проводится сравнение некоторых материалов, которые предлагается применять при создании зеркал. Плотность светового потока и конструкция зеркала здесь выбраны такими, чтобы искажение оптической поверхности W для зеркал из меди с канальной системой охлаждения (см. рис. 1) было близко к 1 мкм. Кроме того, в табл. 2 представлены прогиб оптической поверхности под собственным весом E/ρ , максимальная температура ΔT_{\max} на отражающей поверхности при указанных выше световой нагрузке и конструкции зеркала, а также плотность теплового потока $\sigma_T/(E\beta\Delta T_{\max})$ (σ_T — предел текучести материала зеркала) на отражающей поверхности, которая может привести к пластической деформации материала зеркала.

Как видно из табл. 2, термоупругие деформации оптической поверхности ε_T зеркал из вольфрама и молибдена в $\approx 2,5$ раза меньше деформаций зеркал из меди. Кроме того, вольфрам благодаря высокому пределу текучести выдерживает более высокие плотности теплового потока, чем молибден и медь.

Для крупногабаритных лазерных зеркал, которые относятся к участкам оптического тракта с большой апертурой, плотности светового нагружения невысоки (при сохраняющейся интегральной мощности лазерного пучка), а температура отражающей поверхности ниже, чем в высоконагруженных зеркалах. Это позволяет использовать в качестве материала крупногабаритных зеркал инвар, сохраняющий свои физико-механические ха-

Таблица 2. Характеристики материалов, предлагаемых для создания зеркал

Материал	λ , Вт м ⁻¹ К ⁻¹	$\beta \times 10^6$, К ⁻¹	$E \times 10^{-10}$, Н м ⁻²	$\sigma \times 10^{-7}$, Н м ⁻²	$\rho \times 10^{-3}$, кг м ⁻³	ε_T , мкм	$(E/\rho) \times 10^{-2}$	ΔT_{\max}	$\sigma/(E\beta\Delta T_{\max})$
Медь деформированная	400	17,4	11,2	6,85	8,93	1,02	1,25	12,5	2,8
Вольфрам	160	4,5	40	10,8	19,1	0,36	2,1	22,2	9,3
Молибден	130	5,2	31	29,4	9,01	0,40	3,4	19,7	2,7
Нержавеющая сталь	20	16,6	20,0	23,5	7,85	1,9	2,55	79,9	0,87
Никель	92	13,3	20,2	20,5	8,90	1,13	2,27	26,0	2,9
Алюминий	211	24,5	6,85	6,44	2,70	1,77	2,54	17,2	2,2
Титан	15,5	8,5	10,9	7,5	4,54	1,06	2,42	101	0,8
Бериллий	182	13,7	33	—	1,85	1,03	17,8	18,4	—
Инвар	11	1,6	14,7	—	8,00	0,22	1,84	145	8,00
Кремний	140	3,0	11,3	—	2,42	0,24	4,67	21,5	—
Карбид кремния	110	3,3	39,2	—	3,2	0,28	12,2	25	—

рактеристики только при температурах, близких к комнатным. Перспективными материалами здесь являются также карбид кремния и композиционные материалы на его основе.

4. Проблема снижения веса крупногабаритных зеркал

Будем моделировать всю конструкцию крупногабаритного зеркала в виде круглой достаточно толстой плиты, свободно опёртой по внешнему контуру и нагруженной нормально приложенной нагрузкой с постоянной интенсивностью q . Материал плиты будем считать изотропным.

Прогиб плиты под собственным весом W описывается дифференциальным уравнением [5, 6]

$$D\Delta^2 W = q,$$

$$D = \frac{EH^3}{12(1-v^2)}, \quad \Delta = \frac{1}{r} \left[\frac{d}{dr} \left(r \frac{d}{dr} \right) \right],$$

E — модуль Юнга, H — толщина плиты. В случае шарнирной опоры прогиб и изгибающий момент на внешнем контуре равны нулю,

$$W(R) = M_r(R) = 0.$$

Отсюда

$$W(r) = \frac{qR^4}{64D} \left(\frac{r^4}{R^4} - 2 \frac{3+vr^2}{1+vR^2} + \frac{5+v}{1+v} \right) + \frac{qH^2(R^2-r^2)}{20D(1-v^2)},$$

а прогиб в центре плиты (при $r=0$)

$$W_c = \frac{qR^4}{64D} \frac{5+v}{1+v} \left[1 + \frac{16H^2}{5(1-v)(5+v)R^2} \right]. \quad (11)$$

Определим толщину H такого зеркала, обеспечивающую заданный уровень искажений оптической поверхности, по максимальному прогибу в центре плиты под действием собственного веса. Для этого объёмную весовую нагрузку заменим поверхностной с интенсивностью $q = \rho g H$ (ρ — плотность материала плиты, g — ускорение свободного падения). Решая уравнение (11) относительно H , получим

$$H = \sqrt{\frac{A}{W - AB}},$$

Таблица 3. Характеристики монолитного зеркала диаметром не более 1 м, обеспечивающие его прогиб не более 1 мкм

Материал	ρ , г см ⁻³	E , 10 ⁻⁵ МПа	v	H , см	M , кг
Медь	8,9	1,2	0,3	19	1300
Инвар	8,0	1,5	0,3	16	1000
Бериллий	1,85	3,0	0,1	6	100
Молибден	10,2	3,3	0,3	12	950
Кремний	2,3	1,5	0,3	9	180
Карбид кремния	3,2	4,0	0,3	4	120

где

$$A = \frac{3}{16} \frac{\rho g R^4 (1-v)(5+v)}{E}, \quad B = \frac{16}{5} \frac{v}{(1-v)(5+v) R^2}.$$

В таблице 3 приведены значения толщины H и массы M монолитного зеркала диаметром 1 м, обеспечивающих указанный выше прогиб не более 1 мкм, для различных материалов. Как видно из табл. 3, уменьшение массы монолитного зеркала может быть достигнуто с применением материалов, имеющих высокую удельную жёсткость и малый удельный вес, таких как бериллий, кремний, карбид кремния. Анализ зависимости W_c и массы M от толщины H показывает, что уменьшение прогиба зеркала под собственным весом приводит к необходимости увеличения его толщины и массы.

5. Крупногабаритные зеркала из материалов с сотовой и пористой структурой

Эффективным способом уменьшения массы крупногабаритных зеркал является применение многослойных конструкций с сотовым или пористым заполнителем, состоящих из несущих слоёв и заполнителя, расположенного между ними.

В таких конструкциях несущие слои почти полностью воспринимают продольные нагрузки (растяжение, сжатие, сдвиг) в своей плоскости и поперечные изгибающие моменты, что определяет изгибную жёсткость всей конструкции [7]. Техника снижения веса заключается в минимизации количества материала на нейтральных поверхностях, где это мало сказывается на уменьшении жёсткости.

В крупногабаритных зеркалах отношение толщины к характерному размеру (диаметру) $H/R \approx 0,2 - 0,3$, в то время как в авиации, космонавтике, строительстве применяются трёхслойные конструкции с относительной толщиной менее 0,1. Поэтому результаты большинства работ, посвящённых вопросам расчёта напряжённо-деформированного состояния трёхслойных пластин, используемых в конструкциях летательных аппаратов и строительных конструкциях, нельзя применять к проектированию облегчённых крупногабаритных зеркал, основная задача которого — получение достаточной изгибной жёсткости изделия, чтобы возникающие при указанных выше способах нагружения прогибы оптической поверхности не превосходили допустимого предела.

Расчёт и оптимизацию конструкции крупногабаритного зеркала с сотовым или пористым заполнителем можно провести, положив, что зеркало состоит из отражающей пластины, теплообменника, верхнего несущего слоя пакета, заполнителя и нижнего несущего слоя. Страно решить такую задачу весьма сложно, поэтому для получения обозримых расчётных выражений и доступных для анализа методов расчёта необходимо вводить различные упрощающие допущения и гипотезы.

Как и ранее для монолитных конструкций, принятые допущения позволяют свести изучение напряжённо-деформированного состояния многослойных пакетов к определению изгиба и деформации в области поверхности приведения. Главное отличие расчёта конструкций с сотовым или пористым заполнителем от расчёта монолитных пластин состоит в учёте деформаций сдвига заполнителя. Поэтому необходимо найти условия, при которых сдвиговыми деформациями в заполнителе можно пренебречь.

При равномерном нагружении каждого из несущих слоёв трёхслойного пакета массовыми силами q прогиб для свободно опёртой по контуру трёхслойной пластины [8]

$$W = \frac{qR^4}{EH^2\delta} \left\{ -\frac{1}{64} \left[\frac{5+v}{1+v} + \left(\frac{r}{R} \right)^4 - \frac{2(3+v)}{1+v} \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] + \frac{E\delta H}{GR^2} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \right\},$$

где R — радиус, H — толщина всего изделия, δ — толщина несущих слоёв, E — модуль упругости материала несущего слоя, G — модуль сдвига заполнителя.

В центре пластины

$$W = \frac{qR^4}{EH^2\delta} \left(\frac{5+v}{64(1+v)} + \frac{E\delta H}{GR^2} \right).$$

Здесь второй член в скобках учитывает влияние сдвиговых деформаций. Он положителен, поэтому появление сдвиговых деформаций в заполнителе приводит к увеличению прогибов оптической поверхности под действием массовых сил. Относительная погрешность, которая получается, если пренебречь влиянием сдвигов, становится меньше 15 % при выполнении неравенства

$$\frac{R^2}{H\delta} \frac{G}{E} \geq 100.$$

Это выражение является условием применимости модели многослойной жёсткой плиты для расчёта весовых прогибов крупногабаритных зеркал.

Предположим теперь, что под действием равномерно распределённой световой нагрузки верхний несущий

слой нагревается на ΔT . Будем считать, что температура в нём изменяется линейно. Тогда максимальный прогиб зеркала можно представить в виде

$$W = \frac{M_T R^2}{20E\delta H^2} \left(1 + 2 \frac{E\delta^3}{GHR^2} \right).$$

Здесь M_T — температурный момент, второй член в скобках учитывает влияние сдвиговой жёсткости сотового заполнителя. Относительная погрешность определения термоупругих искажений оптической поверхности при использовании модели многослойного жёсткого зеркала составит менее 15 %, если

$$\frac{HR^2G}{\delta^3 E} \geq 10.$$

Таким образом, известны условия, при которых можно пользоваться упрощёнными моделями, не учитывающими сдвиговых деформаций в заполнителе, в частности моделью многослойной пластины с приведёнными характеристиками. При расчёте реальных конструкций заполнитель заменяется некоторым условным, однородным по объёму, ортотропным или изотропным материалом, приведённые жёсткостные характеристики которого определяются из принципа эквивалентности работы реального и условного заполнителя. Здесь важно получить высокую удельную изгибную жёсткость, чтобы уменьшить искажение оптической поверхности под собственным весом и противостоять термическому изгибу, возникающему при световой нагрузке.

С увеличением толщины многослойного пакета за счёт увеличения расстояния между несущими слоями изгибная жёсткость конструкции возрастает пропорционально квадрату толщины заполнителя, обеспечивающего совместную работу несущих слоёв. Приведённый модуль упругости заполнителя в плоскости, параллельной оптической поверхности, значительно меньше соответствующего модуля несущих слоёв, и основным видом деформации в заполнителе, оказывающим влияние на искажение оптической поверхности, является поперечный сдвиг. Чем меньше модуль сдвига заполнителя и больше относительная толщина, тем выше оказываются сдвиговые деформации.

Результаты расчёта деформаций в крупногабаритных зеркалах диаметром 1 м, изготовленных из различных материалов, приведены в табл. 4. Как видно из таблицы, применение сотовых структур может существенно снизить общую массу зеркала и время выхода его на стационарный режим, сохраняя при этом искажение оптической поверхности.

Таблица 4. Результаты расчёта деформаций в крупногабаритных зеркалах диаметром 1 м

Материал	Масса, кг	Время выхода на стационарный режим	Прогиб под собственным весом, мкм	Термические деформации, мкм
Бериллий	250	10 мин	0,1	2,2
Карбид кремния	350	15 мин	0,15	1,0
Инвар	900	3 ч	1,0	0,4
Молибден (соты)	200	1 с	0,2	2,1
Титан (соты)	130	3 с	0,25	8,5
Инвар (соты)	230	5 с	0,8	0,7

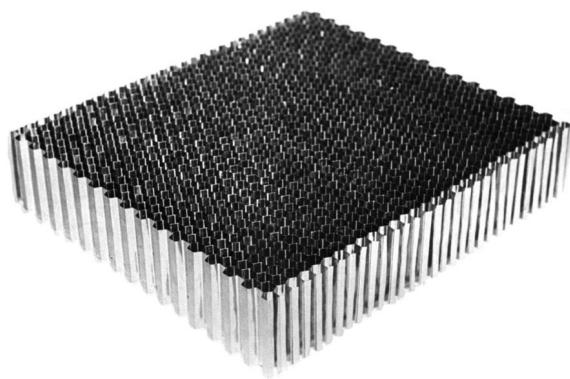


Рис. 3. Сотовая структура из инвара.

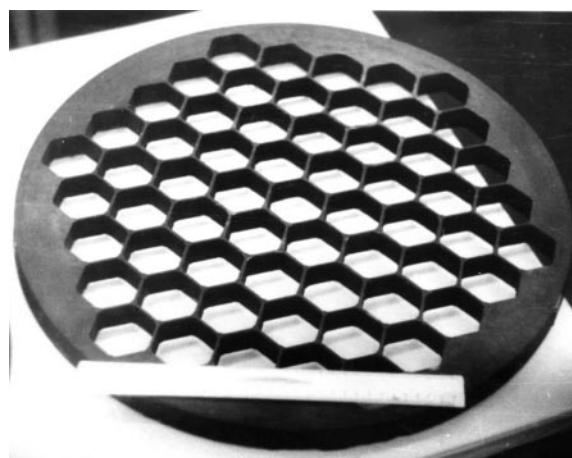


Рис. 5. Сотовая структура из композиционного материала углерод–кремний – карбид кремния.

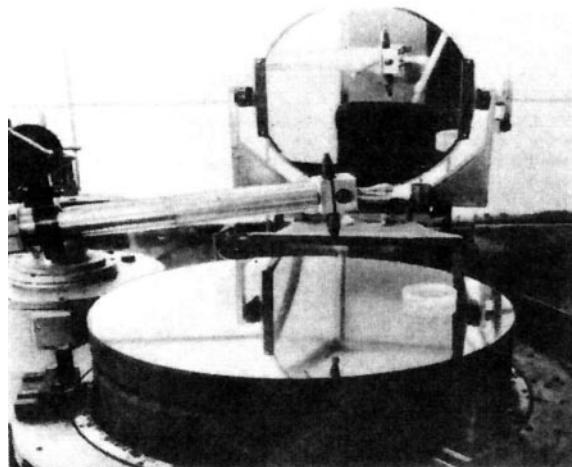


Рис. 4. Зеркало из пористой меди диаметром 1 м.

ской поверхности на приемлемом уровне. На рисунке 3 показан вариант сотовой структуры из инвара. На рисунке 4 представлено крупногабаритное зеркало из пористой меди диаметром 1 м и толщиной 100 мм [9].

Хороших результатов при создании крупногабаритных зеркал следует также ожидать при использовании композиционных материалов с сотовой структурой, способы получения которых в достаточной степени разработаны. Наибольший интерес здесь представляют композиции углерод–кремний – карбид кремния. Соединяя сотовый каркас с монолитными пластинами из того же материала, можно сформировать многослойный сотовый пакет и создать в нём эффективную систему термостабилизации. На рисунке 5 показан один из вариантов сотовой заготовки зеркала из композиционного материала углерод–кремний – карбид кремния.

Large-sized mirrors for power optics

V.Yu. Khomich⁽¹⁾, V.A. Shmakov⁽²⁾

⁽¹⁾ Institute for Electrophysics and Electric Power, Russian Academy of Sciences, Dvortsovaya nab. 18, 191186 St. Petersburg, Russian Federation

⁽²⁾ Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova 38, 119991 Moscow, Russian Federation

E-mail: ⁽¹⁾ Khomich@ras.ru, ⁽²⁾ shmakov@kapella.gpi.ru

Researches into the fabrication of large-sized mirrors for power optics from such materials as invar, SiC, and a C–Si–SiC composite material are discussed. Methods to calculate thermal deformations in cooled mirrors under irradiation with light have been developed. A technique to reduce the mirror weight is suggested that is based on using materials consisting of multilayered cellular structures and porous materials.

Keywords: materials for mirrors, heat transfer, thermal deformation, mirror stability parameters

PACS numbers: 42.79.–e, 44.10.+i

Bibliography — 9 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **189** (3) 263–270 (2019)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.10.038465>

Received 18 January 2018

Physics – Uspekhi **62** (3) (2019)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2018.10.038465>

6. Заключение

Разработка физических основ создания крупногабаритных лазерных зеркал представляет большой научный и практический интерес. В настоящей статье предложена методика расчёта термических деформаций лазерных зеркал при световой нагрузке. Проанализирована зависимость термической стабильности охлаждаемых зеркал от характеристик используемых материалов. Приведены результаты исследований по созданию облегчённых крупногабаритных зеркал из таких материалов, как инвар, карбид кремния и композиционный материал углерод–кремний – карбид кремния.

Список литературы

1. Шмаков В А *Силовая оптика* (М.: Наука, 2004)
2. Аполлонов В В и др. *Письма в ЖТФ* **1** 522 (1975); Apollonov V V et al. *Sov. Tech. Phys. Lett.* **1** 240 (1975)
3. Аполлонов В В и др. *Квантовая электроника* **8** 2208 (1981); Apollonov V V et al. *Sov. J. Quantum Electron.* **11** 1344 (1981)
4. Аполлонов В В, Прохоров А М, Шмаков В А *Квантовая электроника* **33** 655 (2003); Apollonov V V, Prokhorov A M, Shmakov V A *Quantum Electron.* **33** 655 (2003)
5. Love A E H *A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity* (Cambridge: Univ. Press, 1892, 1893); Пер. на русск. яз.: Ляя А *Математическая теория упругости* (М.-Л.: ОНТИ, 1935)
6. Timoshenko S, Woinowsky-Krieger S *Theory of Plates and Shells* (New York: McGraw-Hill, 1959); Пер. на русск. яз.: Тимошенко С П, Войновский-Кригер С *Пластинки и оболочки* (М.: Наука, 1963)
7. Кобелев В Н, Коварский Л М, Тимофеев С И *Расчет трехслойных конструкций* (М.: Машиностроение, 1984)
8. Брюккер Л Э, Наумова М П "Симметричный изгиб круглых трехслойных пластин с легким заполнителем", в сб. *Расчеты элементов авиационных конструкций* Вып. 4 (Под ред. Р Е Лампера) (М.: Машиностроение, 1965) с. 86
9. Алексеев В Н и др. *Письма в ЖТФ* **11** 1350 (1985)