ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 1996, том 34, № 4, с. 619–625

## МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 536.3.621.3

# К РАСЧЕТАМ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЗЕРКАЛ

© 1996 г. Ю. А. Зейгарник, Ф. П. Иванов, Н. П. Икрянников

*ИВТ РАН – НПО "Астрофизика", Москва*

Поступила в редакцию 15.09.95 г.

Проведен анализ факторов, влияющих на термодеформационное состояние отражающей поверхности лазерных зеркал при значительных плотностях облучения. Основное внимание уделено влиянию теплофизических параметров: коэффициенту теплоотдачи в охлаждаемом слое, теплопроводности отражающей поверхности и каркаса, коэффициенту температурного расширения материала отражателя. Рассмотрено влияние геометрических и механических характеристик на термодеформации. На базе проведенного анализа и имеющихся экспериментальных данных по теплоотдаче разработана программа расчетов напряженно-деформированного состояния охлаждаемых зеркал. Для предварительных оценок параметров зеркала рекомендуется номограмма.

**Введение.** В 80-е годы появилось достаточно много работ, подробно описывающих тепловое состояние зеркал, анализирующих деформирование отражающей поверхности, рассматривающих различные системы охлаждения, обеспечивающих съем больших тепловых нагрузок и тем самым отражение мощной лучевой нагрузки [1–9]. Следует отметить, что для большинства технологических приложений достаточны лазерные установки мощностью в несколько, максимум в 5–10 кВт. В этом случае могут использоваться простейшие зеркала (в том числе "таблеточного" типа) с упрощенной системой охлаждения [8]. И лишь в отдельных специальных случаях – резка толстых листов, закалка габаритных деталей, как, например, валков прокатных станов, – и ряде других приходится использовать лазерные установки мощностью в десятки киловатт. В этом случае связанная проблема охлаждения зеркала, имеющего к тому же значительные габариты, и его деформаций становится наиболее важной.

Теоретические разработки, накопленный опыт проектирования в совокупности с полученными экспериментальными данными позволили выделить главные факторы, влияющие на термодеформационные характеристики зеркал, разработать инженерные методики и программы расчета термодеформаций охлаждаемых лазерных зеркал.

Повышение мощности падающего на зеркало потока излучения и поглощение части его зеркалом приводят к формированию в зеркале температурных полей и термодеформациям отражающей поверхности. В свою очередь, это может привести к разъюстировке оптического тракта, уменьшению выходной мощности лазера и в худшем случае к срыву генерации. Естественно, что не только от термодеформаций зависит работоспособность зеркала мощного лазера, она может ограничиваться остаточными деформациями, не исчезающими после снятия нагрузки, плавлением и коррозией поверхности зеркала, плазмообразованием у отражающей поверхности, особенно импульсных лазеров. Эти вопросы достаточно хорошо изучены и описаны в работах [2–4]. Однако в условиях непрерывного и импульсно-периодического воздействия в большинстве случаев ограничивающим фактором является именно достижение предельной величины деформаций отражающей поверхности; обычно это значение $\lambda/10$, где $\lambda$ – рабочая длина волны (для ИК-диапазона $\lambda = 10.6$ мкм).

**Составляющие термических деформаций поверхности зеркала.** Схематически охлаждаемое зеркало показано на рис. 1. Там же качественно показан характер распределения температуры вдоль его оси. Заметим, что в действительности в силу наличия разветвленной коллекторной системы подвода и отвода охладителя температурное поле в корпусе зеркала является не линейным, как изображено на рисунке, а существенно неодномерным. Этот вопрос будет обсужден ниже.

Уже в простейшем случае неохлаждаемых или охлаждаемых с тыльной стороны зеркал деформации определяются многими факторами:

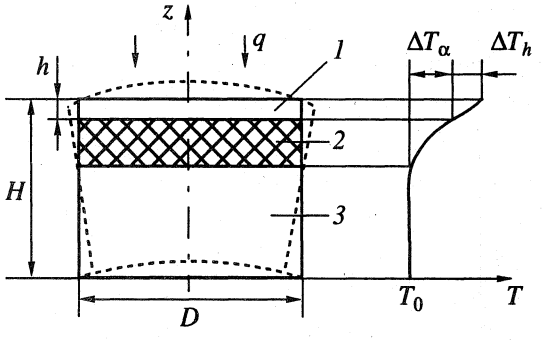


**Рис. 1.** Схема охлаждаемого зеркала: *1* – отражающая пластина, *2* – охлаждаемый слой, *3* – корпус.

плотностью (мощностью) облучения, коэффициентом поглощения, коэффициентом температурного расширения материала зеркала, соотношением его геометрических размеров. У зеркал с внутренней системой охлаждения (а только такие системы могут обеспечить приемлемые деформации зеркал лазеров высокой мощности [1, 2, 7]) помимо приведенных выше факторов влияют интенсивность охлаждения, конструкция системы охлаждения с учетом подводящих коллекторов.

Термические деформации отражающей поверхности зеркала складываются из нескольких составляющих. Основные из них – это деформация изгиба зеркала в целом как многослойного пакета и деформация термического расширения в направлении нормали к отражающей поверхности [3]. Деформацию изгиба в первом приближении (без учета вклада корпуса и охлаждаемого слоя) можно оценить по формуле

$$W_{\text{изг}} = 0.75\alpha_t hq\left[\frac{1}{\alpha_q} + \frac{h}{2\lambda}\right]\left(\frac{D}{H}\right)^2 \times \times\left(\frac{D_{\text{п}}}{D}\right)^2\left[(1+\nu)\ln\frac{D}{D_{\text{п}}} + 1\right]\frac{E_1}{E_3}. \quad (1)$$

Максимальная величина второй составляющей определяется соотношением

$$W_{\text{р}} = \frac{1+\nu}{1-\nu}\alpha_t hq\left(\frac{1}{\alpha_q} + \frac{h}{2\lambda}\right), \quad (2)$$

где $W_{\text{р}}$ – значение абсолютного расширения. В этих формулах $\alpha_t$ – коэффициент температурного расширения материала отражающей пластины; $q$ – средняя плотность поглощенного теплового потока; $\alpha_q$ – эффективный коэффициент теплоотдачи от охлаждаемой пластины, учитывающий развитие поверхности теплообмена и отнесенный к площади отражающей пластины; $D$, $D_{\text{п}}$, $h$ и $H$ – диаметры зеркала и светового пятна, толщина отражающей пластины и зеркала; $E_1$ и $E_3$ – модули Юнга отражающей пластины и корпуса соответственно; $\nu$ – коэффициент Пуассона.

Что касается деформации расширения, то, естественно, важно относительное смещение волокон, которое в первую очередь зависит от распределения плотности облучения на поверхности зеркала. Поэтому рассчитанное по соотношению (2) значение $W_{\text{р}}$ дает оценку сверху.

Как было сказано выше, формулы (1) и (2) не учитывают вклада в деформации охлаждаемого слоя и корпуса, т.е. полагается, что температура отражающей поверхности существенно больше температуры, формируемой в корпусе, так как весь теплосъем происходит в зоне, близкой к отражающей поверхности. Допущение о том, что температуру корпуса следует брать равной температуре охладителя, для технически совершенных устройств неоправданно, но для проведения оценочных расчетов допустимо. (Под технически совершенными устройствами понимаются зеркала с эффективными системами охлаждения и оптимизированными геометрическими характеристиками слоев.)

Если принять в качестве допущения $D = D_{\text{п}}$, т.е. облучение зеркала по всей отражающей поверхности, то выражение (1) примет вид

$$W_{\text{изг}} = 0.75\alpha_t hq\left[\frac{1}{\alpha_q} + \frac{h}{2\lambda}\right]\left(\frac{D}{H}\right)^2\frac{E_1}{E_3}. \quad (3)$$

Видно, что величины $W_{\text{изг}}$ (3) и $W_{\text{р}}$ (2) прямо пропорционально зависят от толщины отражающей пластины $h$. Отсюда следует, что необходимо стремиться к минимуму толщины отражателя. Ограничениями в этом случае могут быть прежде всего возможности технологии и требования обеспечения герметичности отражающей пластины и ее прочности под давлением охладителя.

**Параметры и материалы отражающей поверхности зеркала.** При выполнении отражающей пластины из фольги или путем механической обработки пластинчатой заготовки эти требования обеспечиваются, как правило, при $h$ не меньше 0.2–0.4 мм. В работе [4] описана технология получения отражающих пластин толщиной в несколько десятков микрометров на базе интерметаллидов. Однако, кроме действительно тонкого слоя высаженного отражающего покрытия из интерметаллидов, прилегающий к нему охлаждаемый пористый слой уплотнен как минимум на глубину 150–200 мкм в процессе механического заглаживания. Тем самым "эффективная" толщина отражающего слоя, т.е. слоя, через который практически не течет охлаждающая жидкость, составляет примерно 0.2–0.25 мм.

При малой толщине отражающей пластины может произойти ее локальное выпучивание под действием давления охладителя, что необходимо учитывать в канальных структурах при достаточно больших (более миллиметра) размерах каналов и в сеточных структурах при широких коллекторах.

В случае малых $h$ и высокой теплопроводности отражателя (например, изготовленного из меди) вторым членом в квадратных скобках уравнения (3) можно пренебречь, и тогда

$$W_{\text{изг}} = 0.75\alpha_t q\frac{1}{\alpha_q}\left(\frac{D}{H}\right)^2\frac{E_1}{E_3}. \quad (4)$$

Если отражающая пластина и корпус изготовлены из одного материала, то $E_1 = E_3$; если из разных, то $W_{\text{изг}}$ тем меньше, чем меньше произведение $(\alpha_t E)_1$ и чем выше значение модуля Юнга основания $E_3$. Из сказанного выше следует, что для слоя *1* (см. рис. 1) целесообразно выбирать материал с минимальным значением произведения $(\alpha_t E)$. Например, значение $(\alpha_t E)$ для традиционных материалов отражающих поверхностей, таких, как

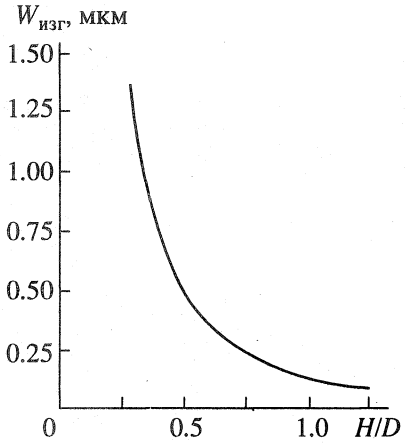


**Рис. 2.** Зависимость деформации изгиба от относительной толщины зеркала. $\Delta T_\alpha$ = 20°C, $h$ = 0.5 мм, материал – медь.

молибден, алюминий, медь, составляет $1.5 \times 10^6$, $1.6 \times 10^6$ и $2 \times 10^6$ Н/м$^2$ К соответственно. То есть, с точки зрения развиваемых отражающей поверхностью изгибных усилий эти материалы практически равноценны, у бериллия $\alpha_t E$ примерно равно $\sim 3 \times 10^6$ Н/м$^2$ К, т.е. в 1.5–2 раза выше. В то же время для опорного слоя *3* предпочтение следует отдать молибдену и бериллию, имеющим более высокие модули Юнга ($E \sim 3 \times 10^7$ Н/см$^2$) и обладающим повышенным сопротивлением деформации изгиба. Таким образом, выбор разнородных материалов для отражающей пластины и корпуса позволяет снижать деформации изгиба. Однако при различии коэффициентов термического расширения отражающей пластины и корпуса изгибные деформации (и кстати, весьма существенные) могут возникать из-за отклонения рабочей температуры зеркала от температуры изготовления. Также необходимо заранее продумать технологическую совместимость соединения разных материалов, в том числе и пористых охлаждаемых слоев.

Из формулы (4) следует, что деформация изгиба пропорциональна квадрату отношения диаметра зеркала $D$ к его толщине $H$. С ростом значения $H/D$ темп изменения $W_{изг}$ затухает (рис. 2). Во избежание чрезмерного увеличения массы зеркала значение $H/D$ целесообразно ограничить величиной 0.4–0.6. Численными расчетами на ЭВМ было подтверждено, что такое ограничение не приводит к существенному увеличению изгибных деформаций.

Анализ расчетных деформаций изгиба зеркал с относительной толщиной $H/D$ = 0.4, изготовленных из различных материалов: меди ($\alpha_t = 1.6 \times 10^{-5}$ K$^{-1}$), бронзы ($\alpha_t = 1.5 \times 10^{-5}$ K$^{-1}$) и молибдена ($\alpha_t = 5.3 \times 10^{-6}$ K$^{-1}$), выполнен в работе [5]. Эффективный коэффициент теплоотдачи принимался равным $5 \times 10^4$ Вт/м$^2$ К (характерное значение теплоотдачи на пористых структурах). Видно (рис. 3), что при толщине отражающей пластины в 1 мм допустимый уровень деформаций менее 1 мкм ($\lambda_p$ = 10.6 мкм) у медного зеркала наблюдается при поглощенных тепловых потоках менее 60 Вт/см$^2$, а у зеркала из молибдена – при тепловых потоках до ~180 Вт/см$^2$. Таким образом, выбор материала с малым $\alpha_t$ (Mo, SiC, Si и т.д.) всегда предпочтителен, если только современная технология позволяет изготовить из него зеркало требуемых размеров с приемлемой совершенной системой охлаждения. Однако если учесть повышенный коэффициент поглощения молибдена, то допустимая по уровням деформации изгиба плотность потока облучения у молибдена без покрытия окажется выше не в 3 раза, а только на 60%.

Как показано выше, величина деформаций, как изгибных [4], так и нормальных (2), прямо пропорциональна разности температур отражающей пластины и охлаждающей жидкости.

Поэтому организация эффективного охлаждения зеркала приобретает особую важность, так как, чем интенсивней теплоотдача, т.е. чем больше $\alpha_q$, тем меньше деформации. Рассматривая

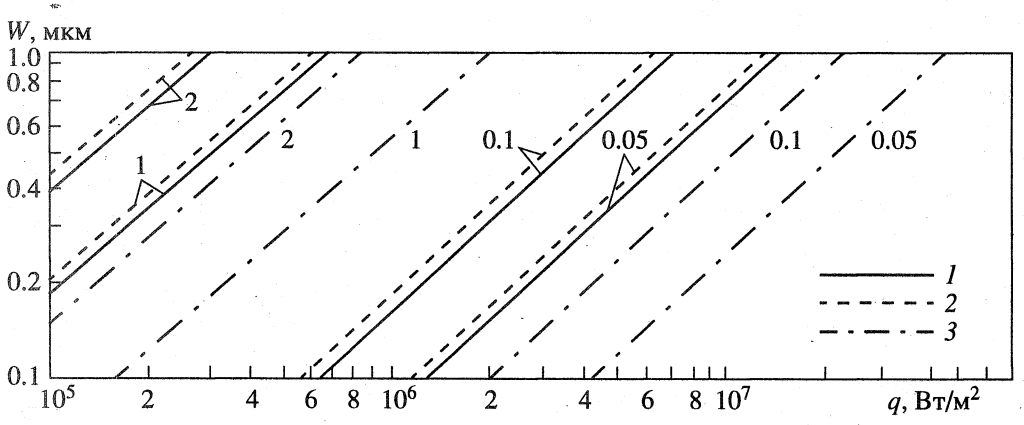


**Рис. 3.** Расчетные деформации изгиба зеркал с различной толщиной отражателя из меди (*1*), бронзы (*2*) и молибдена (*3*) при $H/D$ = 0.4 и $\alpha_q = 5 \times 10^4$ Вт/м$^2$ К. Цифры у кривых $h$ в мм.

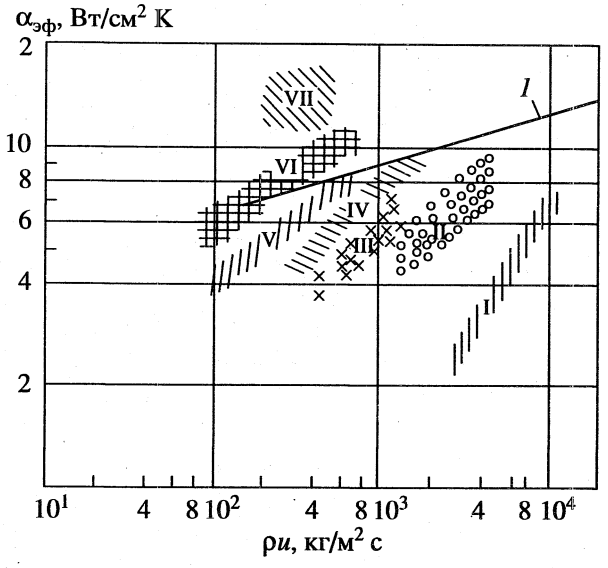


**Рис. 4.** Эффективность систем охлаждения разного типа: I – каналы $d_{экв}$ = 0.5 мм, II – щели 9 × 0.5 мм, III – щеточная система $d$ = 0.9 мм, $h$ = 10 мм, IV – вафельная система, $d$ = 1.1 мм, $h$ = 7 мм, V – сеточная система, $d_{пр}$ = 0.28 мм, 1 ряд; VI – спеченные частицы из бронзы, $d$ = 200–400 мкм; II–IV – данные МИФИ; V–VII – данные ИВТРАН; VII – спеченные частицы, медь (оценка); *1* – $\frac{\Delta P}{\Delta l}$ = 20 кПа/мм – линия постоянных относительных гидравлических потерь давления.

уравнение (3), можно определить разумный уровень требуемых значений $\alpha_q$ в случае изготовления отражающих поверхностей из различных материалов. Видно, что зависящее от $\alpha_q$ первое слагаемое в квадратных скобках больше второго (с учетом $h \ll H$) при $\alpha_q < 2\lambda/h$. Из этого следует, что вплоть до значений $\alpha_q = 2\lambda/h$ интенсификация теплообмена целесообразна, а дальнейшее увеличение $\alpha_q$ также дает эффект, но не столь значительный.

Можно убедиться, что для медных отражателей практически при любых $h$ следует стремиться к максимально достижимым значениям $\alpha_q$. Для зеркал с молибденовой отражающей пластиной толщиной $h$ < 4 мм также имеет смысл получение высоких $\alpha_q$ на уровне 5–10 Вт/см$^2$ К. Однако при использовании для отражающих пластин низкотеплопроводных материалов: инвара с $\lambda \simeq 0.14$ Вт/см$^2$ К, ситалла с $\lambda$ = 0.01 Вт/см$^2$ К, толщина которых в соответствии с технологией изготовления составляет 3–5 мм, целесообразно использовать самые простые системы охлаждения канального типа, стремясь к уменьшению толщины пластины $h$ и простенков между каналами. Более подробно этот вопрос рассмотрен в [1].

**Системы охлаждения зеркал.** Конструкции систем охлаждения, применяемых в металлических зеркалах, достаточно полно описаны в [1, 2, 6] и ряде других работ. Наиболее простой и достаточно распространенной является система охлаждения, выполненная в виде дискретных каналов (канальная система охлаждения). При достаточно больших скоростях движения охладителя (3–5 м/с) и при характерных размерах поперечного сечения канала от долей миллиметра до нескольких миллиметров величина эффективного коэффициента теплоотдачи достигает (2–4) × $10^4$ Вт/м$^2$ К. Совершенствование канальных систем в целях улучшения теплоотдачи осуществляется с помощью:

а) уменьшения характерных размеров каналов (применение электроэрозионной технологии, фототравления и т.д.);

б) использования встречного движения теплоносителя в соседних каналах;

в) применения многослойных систем охлаждения (типа "сэндвич");

г) уменьшения расстояния между точками входа и выхода теплоносителя, т.е. реализации режима теплообмена на начальном тепловом участке.

Наиболее перспективными из канальных систем охлаждения являются схемы "перевального" типа, когда жидкость выполняет сложный путь, переходя с одного слоя каналов на другой, и претерпевает интенсивное промежуточное перемешивание. Эффективный коэффициент теплоотдачи в таких каналах достигает (4–6) × $10^4$ Вт/м$^2$ К. Однако технологически этот вариант достаточно сложен.

Общим недостатком всех систем канального типа является то, что их трудно сочетать с тонкими отражающими пластинами, поскольку в местах контакта этих пластин с каналами отсутствуют должные опоры, а на сами каналы обычно приходится до 75% сечения зеркал.

Стремление интенсифицировать теплоотдачу, обеспечить сравнительно равномерное охлаждение отражающей пластины, уменьшить протечки тепла в корпус зеркала и создать условия для жесткого соединения отражающей пластины с корпусом приводит к созданию систем охлаждения мелкоячеистого типа (часто их называют пористыми). К пористым системам можно отнести одно- и многорядные сетки, спеченные материалы, войлоки, порометаллы [1, 7, 10] или так называемые неупорядоченные структуры и интенсификаторы типа столбиков, вафель, щеток, которые относятся к классу упорядоченных, или регулярных, структур [3]. В пористых структурах достаточно просто достигаются коэффициенты теплоотдачи до (5–10) × $10^4$ Вт/м$^2$ К.

Часто на практике применяют системы струйного охлаждения, когда теплоноситель, истекающий из системы распределенных вдоль поверхности сопл, омывает близлежащий участок поверхности. Оптимальное сочетание шага сопл, их диаметра и расстояния до отражающей поверхности позволяет получать высокие значения коэффициента

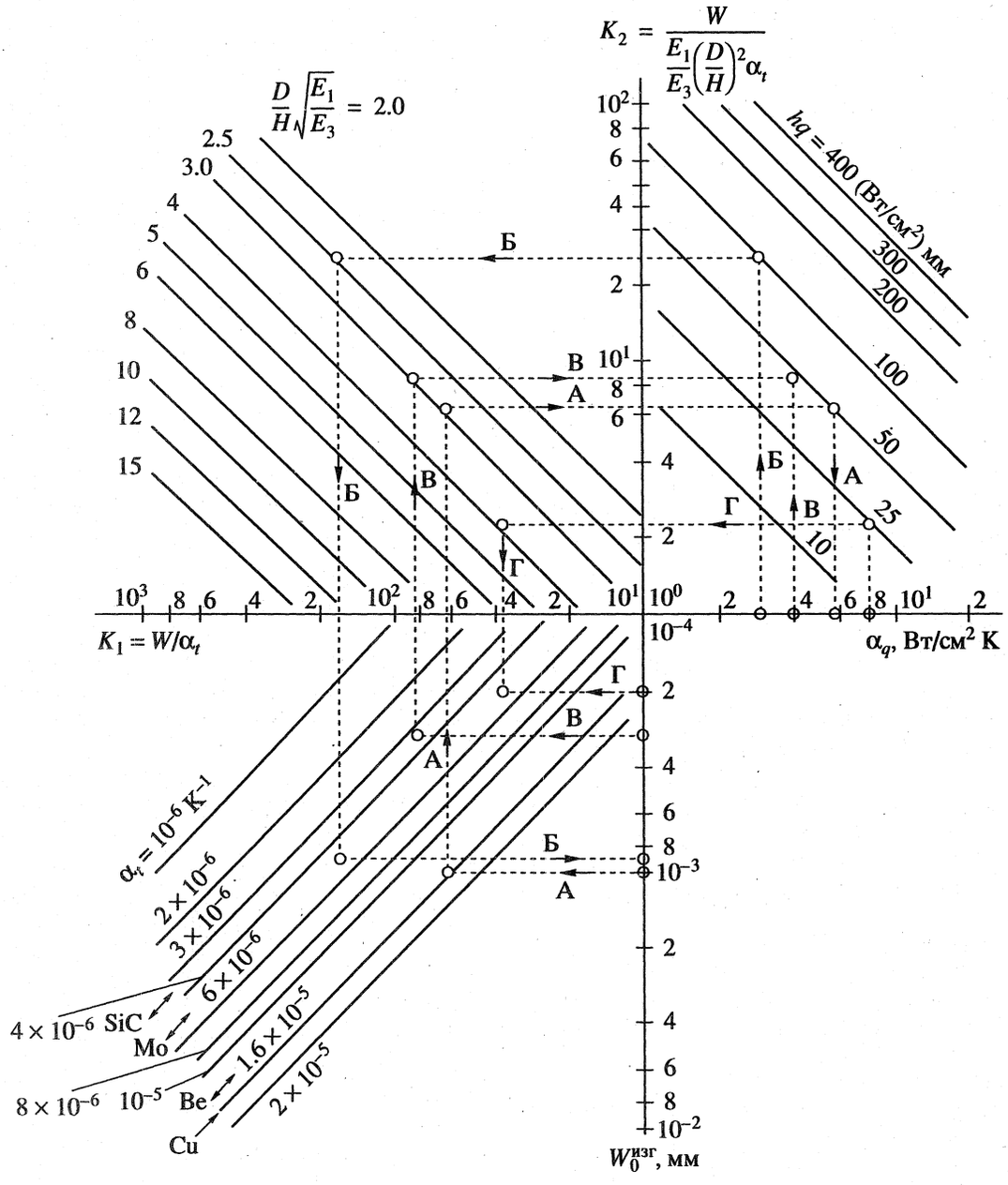


**Рис. 5.** Номограмма для оценки термодеформационных характеристик охлаждаемых зеркал.

теплоотдачи (до $10^5$ Вт/м$^2$ К), но серьезным недостатком этих систем является отсутствие жесткой связи отражателя с корпусом.

На рис. 4 представлены опытные данные по коэффициентам теплоотдачи, полученные разными авторами [1, 2, 10], иллюстрирующие сравнительную эффективность различных систем охлаждения. Область рабочих массовых скоростей для каждой системы охлаждения справа ограничена либо приемлемым значением перепада давления, либо разумной величиной расхода, а слева – достижением некоторого минимально возможного для данной системы значения коэффициента теплоотдачи. Этими данными можно воспользоваться с целью предварительного выбора системы охлаждения.

Мы не рассматриваем здесь системы охлаждения, использующие фазовый переход (типа тепловых труб). В целом они не дают заметного выигрыша в величине $\alpha_q$ по сравнению с лучшими из упомянутых выше вариантов однофазного охлаждения, хотя и сокращают расход охладителя. Запуск таких систем и соблюдение оптимальных режимов работы оперативно достаточно сложны. Указанные системы пока еще находятся на стадии ранних опытно-конструкторских проработок.

Изложенное выше определяет общие подходы к проектированию зеркал.

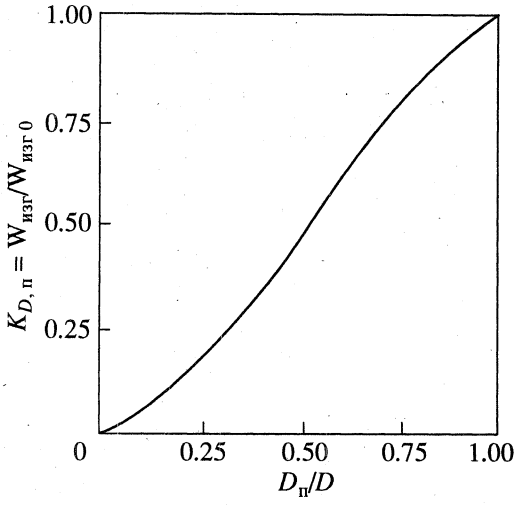


**Рис. 6.** Поправка к $W^0_{изг}$ на величину относительного размера пятна облучения (центральное пятно, $q$ = = const).

**Численный и приближенный методы расчета.** В ИВТРАН на основе метода конечных элементов был разработан программный комплекс для расчета температурных полей и полей смещений зеркал осесимметричных или сводимых к осесимметричным конфигураций. (Разработку этого комплекса обеспечили С.В. Усатиков, Е.З. Король и Н.И. Силина.) Программный комплекс сопровождается программой гидравлического расчета разветвленной системы охлаждения, имеющей самостоятельную ценность. Эти программы, верифицированные на зеркалах простых конструкций, хорошо зарекомендовали себя при расчете мощных зеркал, спроектированных и изготовленных в ИВТРАН и НПО "Астрофизика", прошедших исследования и испытания на соответствующих стендах, оснащенных современной диагностикой, и в промышленных условиях, в частности в газодинамическом лазере мощностью 40 кВт для закалки валков прокатного стана Череповецкого металлургического комбината.

Однако заметим, что расчеты по этим программам при достаточно большом числе узлов (а это необходимо для достижения желаемой точности определения деформаций) требуют весьма больших затрат машинного времени, что обусловлено прежде всего достаточно громоздкой матрицей жесткости, входящей в программу расчетов смещений. При определенных значениях $\lambda$ и коэффициентов теплоотдачи в охлаждаемом слое дробление сетки (размеров конечных элементов) необходимо и для обеспечения сходимости решения. Тем самым проведение оптимизационных или вариантных расчетов по этим программам нерационально.

Для проведения серийных расчетов в ИВТРАН обычно используется номограмма (рис. 5), построенная на основе формул (2), (3). Она учитывает режимные факторы – тепловую нагрузку, коэффициент теплоотдачи; конструктивные характеристики – толщину отражающего слоя, толщину зеркала в целом, его диаметр; механические и теплофизические свойства материала зеркала – коэффициент температурного расширения, модуль Юнга отражающей пластины и корпуса. При построении номограммы предполагалось, что равномерно облучается вся отражающая поверхность и изгибные деформации являются преобладающими. Она дополняется графиками, вводящими поправки на неполное облучение поверхности (диаметр пятна $D_п$) (рис. 6) и вклад деформации расширения (рис. 7). Первый позволяет учесть размер пятна облучения, т.е. $W^{полн}_{изг} = W^0_{изг} K_{Dп}$, где $W^0_{изг}$ – деформация изгиба, определенная по номограмме или по формуле (4), а второй – перейти от изгибной к полной деформации $W_\Sigma = W^0_{изг} + W_р$. Номограммой можно пользоваться непосредственно в графическом виде либо в трансформированном в соответствующую несложную программу. Однако в последнем случае, как всегда, исчезает "чувственное" восприятие оптимизируемого объекта, что иногда имеет отрицательные последствия.

Номограмма позволяет выполнять предварительные расчеты (оценки) для конструкторских целей, например определить уровень коэффициента теплоотдачи $\alpha_q$, при котором деформация зеркала не превышает требуемых значений (вариант по стрелке "А"). В последующем это значение $\alpha_q$ будет служить основой для выбора системы охлаждения. В рамках поверочного расчета зеркала при заданных конструкции, а тем самым при известном $\alpha_q$, и поглощенном тепловом потоке $q$ с помощью номограммы определяется величина $W^{изг}_0$ (вариант по стрелке "Б"). Используя номограмму при заданном значении $W^{изг}_0$, можно найти допустимое значение $q$ (см. вариант по стрелке "В") или максимально допустимое значение коэффициента термического расширения – $\alpha_t$ (см. вариант по стрелке "Г").

В таблице приведено несколько примеров сопоставления оценок термодеформаций реальных зеркал с помощью номограммы с результатами их измерений в стендовых условиях.

Таблица показывает хорошее, во всяком случае для первичных оценок, согласование данных по деформациям.

Как упоминалось выше, при оптимальных геометрических характеристиках отражающего слоя зеркала в целом и эффективной системе охлаждения все большую роль в термодеформациях начинают играть неоднородные температурные поля в корпусе зеркала. Этот вопрос носит принципиальный характер, поскольку успехи в

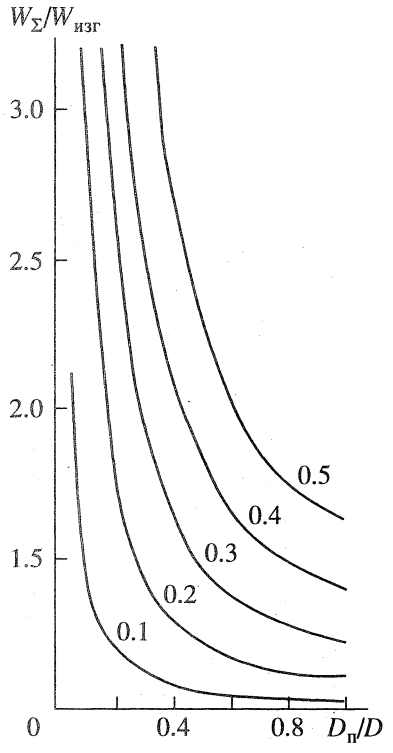


**Рис. 7.** Зависимость суммарной деформации $W_\Sigma$ от относительного размера пятна облучения $D_п/D$ и относительной толщины пакета $H/D$. Цифры у кривых – $H/D$.

совершенствовании систем охлаждения (разработаны научно-инженерные основы их создания, отработано несколько надежных технологий их реализации) выявили новые проблемы, которые ранее не рассматривались. Именно оптимизации температурных полей в корпусе зеркала необходимо уделять особое внимание. Некоторые стороны этой проблемы, такие, как многоярусное охлаждение, частичная тепловая самокомпенсация деформаций и другие, рассмотрены в [11].

Сложность и многомерность температурных полей в корпусе зеркала делают маловероятным корректное их определение в упрощенной постановке и в первом приближении приемлемую оценку вклада температурных полей в корпусе в суммарные деформации. Иными словами, использование достаточно сложных и требующих большого машинного времени расчетных программ в данном случае, по-видимому, неизбежно. Естественно, если, используя уже накопленный опыт, о котором говорилось в статье, на данной стадии расчетов задаться близкими к оптимальным начальными характеристиками отражающего слоя и системы охлаждения, то можно избежать необходимости сгущения сеток (дробления элементов) в этих слоях и использовать высвободившиеся ресурсы памяти ЭВМ для оптимальной разбивки массива корпуса. Подобную задачу еще предстоит решить.

Сравнение расчетных и экспериментальных значений деформаций

| № | Материал, форма и система охлаждения | $W$, мкм (оценка) | $W$, мкм (эксп.) | $\frac{H}{D}$ | $\frac{D_п}{D}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Медь, круг в плане, сетчатая | 0.72 | 0.64 | 0.36 | 0.855 |
| 2 | Медь–отражатель, титан–корпус, круг в плане, сетчатая | 0.35 | 0.40 | 0.41 | 0.73 |
| 3 | SiC, круг в плане, канальная | 0.20 | 0.15 | 0.63 | 0.83 |
| 4 | Молибден, квадрат в плане, канальная | 0.18 | 0.24 | 0.688 | 0.78 |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Петухов Б.С., Алексеев В.А., Зейгарник Ю.А. и др.* Проблемы теплообмена в охлаждаемых зеркалах технологических лазеров // ТВТ. 1985. Т. 23. № 6. С. 1200.
2. *Харитонов В.В.* Теплофизика лазерных зеркал. М.: МИФИ, 1993. С. 152.
3. *Аполлонов В.В., Барчуков А.И., Карлов Н.В. и др.* Термическое воздействие мощного лазерного излучения на поверхность твердого тела // Квантовая электроника. 1975. Т. 2. № 2. С. 380.
4. *Аполлонов В.В., Барчуков А.И., Бородин В.И. и др.* Повышение порогов оптического разрушения металлических зеркальных поверхностей при их охлаждении через структуры с открытой пористостью // Письма в ЖТФ. 1978. Т. 4. Вып. 19. С. 1193.
5. *Зейгарник Ю.А., Ковалев С.А., Король Е.З. и др.* Анализ деформированного состояния тонкого слоя многослойной пластины при ее нагреве // Теплообмен и термические деформации в охлаждаемых многослойных системах. М.: ИВТАН, 1982. С. 5.
6. *Цеснек Л.С., Сорокин О.В., Золотухин А.А.* Металлические зеркала. М.: Машиностроение, 1983. 231 с.
7. *Аполлонов В.В., Быстров П.И., Гончаров В.Ф. и др.* Перспективы использования пористых структур для охлаждения элементов силовой оптики // Квантовая электроника. 1979. Т. 6. № 12. С. 2533.
8. *Зейгарник Ю.А., Иванов В.Ф., Иванов Ф.П., Икрянников Н.П.* К выбору области рационального использования охлаждаемых зеркал // ТВТ. 1984. Т. 22. № 4. С. 803.
9. *Саттон Дж.У.* Модель тепловых искажений зеркал высокоэнергетического импульсно-периодического лазера // Аэрокосмическая техника. 1983. Т. 1. № 5. С. 176.
10. *Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П., Икрянников Н.П.* Опытные данные по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению в неупорядоченных пористых структурах // Теплоэнергетика. 1991. № 2. С. 33.
11. *Зейгарник Ю.А., Иванов Ф.П., Любарский С.В. и др.* Температурные поля в корпусе зеркала и термические деформации отражающей поверхности // ТВТ. 1993. Т. 31. № 2. С. 308.