

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКИХ ПЛАСТИНАХ ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ И ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Предложен расчетно-экспериментальный метод определения остаточных напряжений в тонких пластинах. Метод включает операции создания на исследуемой поверхности зондирующего отверстия, измерения в его окрестности методом голографической интерферометрии перемещений, вызванных освобождением внутренних напряжений. Переход от измеренных перемещений к остаточным напряжениям осуществляется путем численного решения плоской задачи теории упругости методом граничных интегральных уравнений.

1. Введение. В соответствии с общим принципом определения остаточных напряжений высверловка отверстия в пластинке эквивалентна приложению к границе выреза напряжений равных по величине и противоположных по знаку напряжениям, действовавшим на цилиндрической поверхности до высверливания отверстия. Задача состоит в определении этих напряжений по известному возмущенному полю перемещений возле кругового отверстия.

В настоящее время при определении остаточных напряжений способом отверстий широкое применение находят голографические методы [1-7], с помощью которых исследуют поля перемещений на поверхности изучаемого элемента конструкции, возникающие в результате высверливания отверстия. В одной из первых таких работ [1] для установления связи между перемещениями и трехосным остаточным напряженным состоянием используют результаты расчета методом конечных элементов полупространства с цилиндрической выемкой, загруженной осесимметричными напряжениями, линейно изменяющимися по глубине выемки. При этом переход от перемещений, найденных в процессе расшифровки интерференционных картин, к напряжениям осуществляется по специальным номограммам, построенным по результатам расчетов для различных отношений диаметра отверстия к его глубине.

При исследовании остаточных напряжений в тонких пластинах и оболочках чаще всего применяют сквозное сверление отверстий. Для этого случая результаты численного решения в трехмерной постановке для бесконечной пластинки с круглым отверстием приводятся в [1]. В ряде работ трехмерностью остаточного напряженного состояния пренебрегают и для получения уравнений связывающих порядки интерференционных полос с величиной остаточных напряжений используют решение Кирша [2]. При этом так же, как и в [1], применяется схема записи голограмм с боковым опорным пучком. В дальнейшем этот подход был использован в работе [3], в которой для обработки интерференционных картин применялась автоматизированная система ввода и обработки оптических изображений, а в [4] использовалась запись интерферограммы на термопласт. Спекл-сдвиговой интерферометр в комбинации с методом отверстий описан в [5], но авторы не приводят количественные результаты исследований. Отметим, что схемы записи голограмм с боковым опорным пучком требуют высокой виброизоляции экспериментальной установки.

Новые возможности появляются при использовании схемы записи голограмм во встречных пучках и креплении фоторегистрирующей среды на изучаемой поверхности [6-8]. При этом существенно снижаются требования к виброизоляции экспериментальной установки и записывать приходится только одну голограмму. В [5] высверловка отверстий производится с обратной стороны изделия.

Основными недостатками перечисленных выше способов определения остаточных напряжений являются: низкий контраст интерференционных полос, обусловленный их локализацией на удалении от поверхности изучаемого изделия и влиянием спекл-шума, что особенно заметно при фотографировании картины полос с большим увеличением; трудность вычисления напряжений около свободных внешних контуров изделий и в зонах с высокими градиентами деформаций.

В настоящей работе для повышения контраста интерференционных полос вблизи сквозного зондирующего отверстия в тонких пластинах и оболочках предлагается использовать зеркальный металлизированный растр, закрепляемый непосредственно на изучаемом участке образца [9]. Сверление отверстия производится непосредственно через такой растр. Для вычисления напряжений используют процедуру метода граничных интегральных уравнений [10], задавая в качестве исходной информации порядковые номера интерференционных полос вдоль 2-3 концентрических окружностей с центрами в точке сверления, что позволяет, в отличие от [1-7], получить распределение упругих остаточных напряжений вдоль контура отверстия без введения каких-либо гипотез о виде эпюр напряжений σ_{θ} и $\tau_{r\theta}$, и, кроме того, мож-

но получить информацию о напряженном состоянии пластины внутри высверленной области.

2. Определение граничных условий задачи. Пусть координатная плоскость xoy декартовой системы координат xuz совпадает с внешней поверхностью образца и пусть на этой плоскости заданы две границы области — концентрические окружности с центрами в предполагаемой точке сверления образца. Требуется с помощью метода голографического муара определить перемещения U и V вдоль этих окружностей в дискретном числе точек [9, 11].

Для случая нормального освещения поверхности изделия при отсутствии зазора между этой поверхностью и регистрирующей средой связь между разностью хода интерферирующих лучей света и проекциями U , V и W вектора перемещения Δr (ось z совпадает с внешней нормалью к поверхности образца) имеет вид:

$$U \cos \alpha + V \cos \beta + W(1 + \cos \gamma) = N_k \lambda \quad (2.1)$$

где α , β , γ — углы, характеризующие направление наблюдения в отраженном свете, λ — длина волны источника, N_k ($k=1, 2, 3, 4$) — порядковые номера интерференционных полос в рассматриваемой точке.

Комбинируя уравнения для интерференционных картин, наблюдаемых с 4-х симметричных относительно оси z направлений, получаем выражения для определения U , V и W :

$$U = \frac{1}{2} \lambda (\cos \alpha)^{-1} (N_1 - N_2) \quad (2.2)$$

$$V = \frac{1}{2} \lambda (\cos \beta)^{-1} (N_3 - N_4) \quad (2.3)$$

$$W = \frac{1}{2} \lambda (1 + \cos \gamma)^{-1} (N_1 + N_2) \quad (2.4)$$

Направления наблюдения интерференционных картин в рассматриваемом методе определяются структурой и частотами зеркального раstra ϕ . Учитывая, что в дальнейшем в основном будут рассматриваться тангенциальные перемещения U и V , определяющие деформации ε_x , ε_y , γ_{xy} , следует применять растры с высокой частотой ($\phi > 1000 \text{ мм}^{-1}$), так как в этом случае увеличиваются чувствительности $S_{U,V}$ интерферометра к перемещениям U и V . По интерференционной картине, записанной в нулевом порядке дифракции, находят перемещения W (в этом случае в уравнении (2.4) следует положить $\gamma=0$) и направления главных напряжений σ_1 и σ_2 , так как при этом вид интерференционной картины не зависит от ориентации раstra.

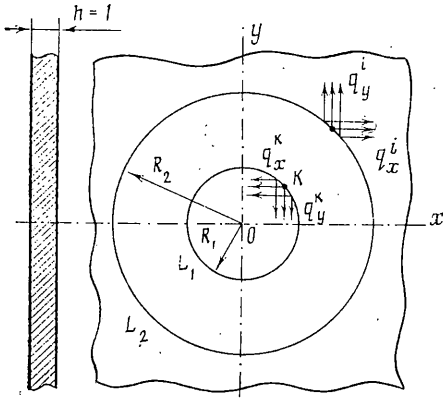
Нумерацию интерференционных полос следует начинать с участков поверхности, удаленных от зондирующего отверстия на расстояние 3–5 его диаметров. Согласно принципу Сен-Венана на таком удалении локальное возмущение, вызванное частичной деструкцией материала, будет пренебрежимо мало. Такие участки имеют равномерную освещенность и в этом месте порядковый номер полосы равен нулю.

Для правильного задания знака функции $N(x, y)$ необходимо иметь априорную информацию о направлении вектора перемещения хотя бы в одной точке. В [12] для этой цели предложено производить кернение пластины вблизи зондирующего отверстия. Качественную проверку правильности нумерации интерференционных полос можно выполнить, применив сканирование голограммы узким лучом лазера.

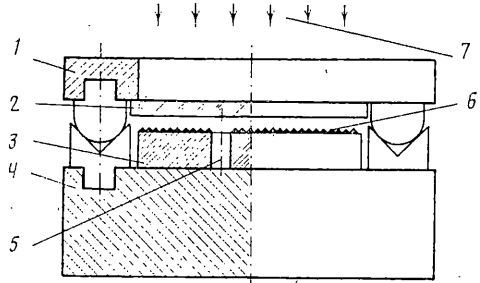
Так как экспериментальным путем определяются порядки полос N_i только в точках их пересечения с границами исследуемой области, то возникает задача аппроксимации функции порядков полос $N(x, y)$ вдоль этих границ на неравномерно заданной сетке. Границы области отождествляются с осями кольцевых статически неопределимых балок, имеющих опоры в местах пересечения их осей с центрами интерференционных полос. Сечения кольцевых балок в пределах каждого участка между опорами считаются постоянными. Аппроксимирующие полиномы ищутся в виде упругих линий изгиба кольцевых балок, внешнее воздействие на которые задается известным смещением опор в направлении, перпендикулярном плоскости их кривизны на величины, пропорциональные порядкам интерференционных полос [10].

3. Вычисление напряжений. Далее плоская задача теории упругости с заданными граничными условиями в виде смещений решается методом интегральных уравнений, так как по сравнению с методами конечных разностей и конечного элемента в этом случае существенно понижается порядок системы алгебраических уравнений и отпадает необходимость в составлении уравнений для точек, расположенных внутри рассматриваемой области. При этом предполагается, что заданная область является частью сплошной бесконечной плоскости единичной толщины, внутри которой по контурам L_1 и L_2 действуют некоторые неизвестные, подлежащие определению, распределенные нагрузки q_x и q_y (фиг. 1), при которых на контурах L_1 и L_2 выполняются заданные граничные условия. Учитывая, что зачастую после сверления отверстия его контур не идеален, в программе предусмотрена замена граничных условий по контуру L_1 на соответствующие условия для близлежащего контура L_1' ($R_1' = 1,05R_1$).

Каждый из контуров границы L_1 и L_2 разбивается на n достаточно малых участков, в пределах которых неизвестные распределенные нагрузки q_x и q_y считаются



Фиг. 1



Фиг. 2

постоянными. При решении задачи по предлагаемой схеме используется фундаментальное решение для сосредоточенной силы, действующей в бесконечной плоскости [13]. Сила приложена в начале декартовой системы координат и по направлению совпадает с осью x . Выражения компонент напряжений и смещений по двум взаимно перпендикулярным площадкам, проходящим через точку с координатами (x, y) имеют вид (G — модуль сдвига, ν — коэффициент Пуассона):

$$\sigma_x = \frac{P}{4\pi} \frac{x}{x^2+y^2} \left[-(3+\nu) + (1+\nu) \frac{2y^2}{x^2+y^2} \right] \quad (3.1)$$

$$\sigma_y = \frac{P}{4\pi} \frac{x}{x^2+y^2} \left[1-\nu-2(1+\nu) \frac{y^2}{x^2+y^2} \right] \quad (3.2)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{P}{4\pi} \frac{y}{x^2+y^2} \left[1-\nu+2(1+\nu) \frac{x^2}{x^2+y^2} \right] \quad (3.3)$$

$$U = -\frac{P}{8\pi G} \left[\frac{3-\nu}{2} \ln(x^2+y^2) + (1+\nu) \frac{y^2}{x^2+y^2} \right] \quad (3.4)$$

$$V = \frac{P}{8\pi G} (1+\nu) \frac{xy}{x^2+y^2} \quad (3.5)$$

Напряжения и перемещения в точках области расположенных вне участка приложения распределенных нагрузок q_x и q_y определяются по формулам (3.1)–(3.5) от действия сосредоточенной силы, являющейся равнодействующей этих нагрузок в пределах участка их приложения. Для точки, принадлежащей этому участку, напряжения и перемещения определяются от суммарного действия системы сосредоточенных сил, эквивалентно заменяющих равномерно распределенную нагрузку. При вычислении напряжений в этом случае к вычисленным значениям соответствующих компонент добавляются дополнительные слагаемые, учитывающие сингулярность. От действия равномерно распределенной нагрузки q_x эти дополнительные слагаемые определяются по формулам

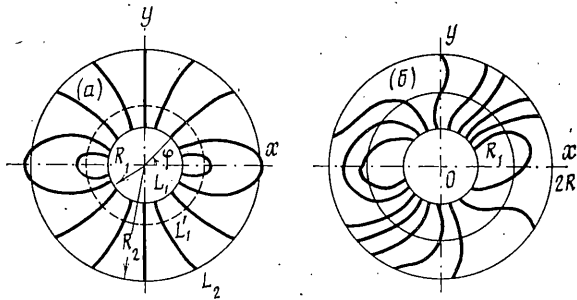
$$\sigma_x = \pm 1/2 q_x \cos \delta [1 + (1+\nu) \sin^2 \delta] \quad (3.6)$$

$$\sigma_y = \mp 1/2 q_x \cos \delta (\sin^2 \delta - \nu \cos^2 \delta) \quad (3.7)$$

$$\tau_{xy} = \pm 1/2 q_x \sin \delta (\sin^2 \delta - \nu \cos^2 \delta) \quad (3.8)$$

где δ — угол между нормалью к участку контура границы в рассматриваемой точке и осью x .

Используя решение от действия равномерно распределенной нагрузки q_x и q_y в пределах участка, можно суммированием по всем участкам найти полные выражения для перемещений точек границы области. Краевые условия записываются для срединных точек участков разбиения границы и включают 4π неизвестных значений нагрузок q_x и q_y . Таким путем получаем систему линейных уравнений, из решения которой определяются значения q_x и q_y , а далее — напряжения и смещения



Фиг. 3

на границе и внутри заданной области, отражающие напряженно-деформированное состояние, вызванное высверливанием отверстия.

Такое же напряженно-деформированное состояние можно получить и в случае приложения к границе выреза внешних напряжений, значения которых вычисляются по следующим зависимостям

$$X_n = \sigma_x \cos \delta + \tau_{xy} \sin \delta \quad (3.9)$$

$$Y_n = \tau_{xy} \cos \delta + \sigma_y \sin \delta \quad (3.10)$$

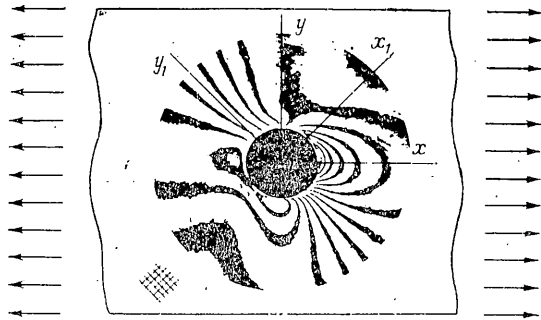
Для отыскания остаточных напряжений в пределах высверленной области производится расчет сплошного диска радиуса R_1 от усилий X_n и Y_n взятых с обратным знаком. Результаты расчета выдаются в виде таблиц деформаций и напряжений по каждой окружности, а также в центре этих окружностей. Возможно представление информации в виде изолиний деформаций ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy} , ϵ_r , ϵ_θ , $\gamma_{r\theta}$ и напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} , σ_r , σ_θ , $\tau_{r\theta}$.

4. Техника проведения эксперимента. Голографический интерферометр, предназначенный для регистрации остаточного формоизменения исследуемого образца после высверловки в нем отверстия малого радиуса, должен удовлетворять следующим требованиям: позволять производить зондирующее отверстие между экспозициями, обеспечивать возвращение голограммы на прежнее место после высверловки отверстия с точностью до 0,3 мкм, гарантировать исследователю приемлемое время проведения эксперимента.

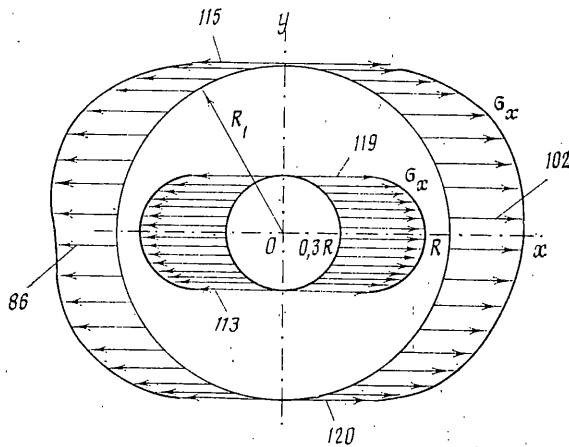
В настоящей работе использовался интерферометр на основе трехточечного контакта (фиг. 2) жестко закрепленный на массивном основании в вертикальном положении (крышка 1 интерферометра размещается сверху). Образец 3 жестко закреплялся на пьедестале 4 интерферометра, а на его съемной крышке 1 помещали фотопластинку 2. Расстояние между исследуемой поверхностью и фотоэмульсией менее 1 мм. Фотопластинка освещалась по нормали к ее поверхности когерентной световой волной с плоским волновым фронтом 7. Голограммы записывались методом двух экспозиций. После первой экспозиции крышка интерферометра удалялась и производилось сверление отверстия 5. Затем возвращали крышку на прежнее место и производили вторую экспозицию, равную по длительности первой. Для фотохимической обработки фотопластинку отделяют от крышки и помещают в кювету с проявителем. Способ обработки — обычный для эмульсий ЛОИ-2, ПЭ-2, ПФГ-2.

В отличие от метода голографической интерферометрии [14] метод голографического муара, позволяя получать контрастные интерференционные картины вблизи контура зондирующего отверстия, не обеспечивает плавного изменения чувствительности к измеряемым перемещениям. В связи с этим возникает проблема выбора частоты раstra 6, обеспечивающей получение приемлемой для расшифровки интерференционной картины. Так как уровень внутренних напряжений заранее не известен, то поступают следующим образом: наносят на образец растр с возможно большей частотой ($1000-1300 \text{ мм}^{-1}$), варьируя диаметр отверстия, добиваются приемлемой для рассматриваемой задачи частоты интерференционных полос, а как было показано в [1], частота полос линейно связана с диаметром зондирующего отверстия.

С целью обеспечения высокого качества приклейки раstra поверхность изделия обезжиривается, эпоксидная смола ЭД-6 и катализатор ПЭП обезвоживаются. Для этого они выдерживаются в открытых ванночках в тремостатированном шкафу при температуре 100° в течение 1 часа. После естественного охлаждения до 30°C эти компоненты соединялись в соотношении 10:1 и тщательно перемешивались в течение 5 мин. Такая технология нанесения раstra, благодаря хорошей адгезии раstra к поверхности образца, обеспечила высокое качество контуров отверстий диаметром от 1 до 5 мм, выполняемых с помощью электрической дрели. Угловая скорость вращения сверла не превышала 70 рад/с.



Фиг. 4



Фиг. 5

5. Экспериментальные результаты. В качестве тестового примера рассматривалась задача об одноосном однородном растяжении изотропной пластинки единичной толщины, упругие характеристики материала которой соответствовали параметрам сплава Д16Т. Начальные напряжения до высверливания отверстия $\sigma_x=96$ МПа, $\sigma_y=0$ МПа, $\tau_{xy}=0$ МПа.

Воспользовавшись известным аналитическим решением задачи Кирша построили поля перемещений U, V соответствующие возмущенному деформированному состоянию в пластинке после высверливания отверстия радиуса $R_1=1,3$ мм (поле U приведено на фиг. 3, а). Найденные перемещения использовались в качестве исходной информации для определения напряжений по описанному выше алгоритму. Контуры границы рассматриваемой области – концентрические окружности с радиусами R_1 и $R_2=2R_1$. Полученные результаты расчета напряжений σ_x, σ_y и τ_{xy} (в МПа) вдоль кольца радиуса R_1 при различных значениях угла φ , приведенные ниже, удовлетворительно согласуются с начальными напряжениями.

φ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
σ_x	95,2	95,0	95,5	95,4	94,2	95,5	96,1	94,9	95,1	95,9
σ_y	-5,2	-5,0	-5,4	-5,5	-4,3	-5,1	-6,2	-4,7	-4,9	-5,9
τ_{xy}	0	0	0,2	-0,5	-0,1	1,1	-0,3	-0,5	0,6	0

Другим подтверждением хорошего приближения предложенного подхода к аналитическому решению являются результаты вычисления направления одного из главных напряжений σ_1 в точке высверливания [15]:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{\varepsilon_{r3} - \varepsilon_{r2} - (\varepsilon_{r3} - \varepsilon_{r1}) \cos 2\varphi_1 + (\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}) \cos(\varphi_1 + \varphi_2)}{(\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}) \sin 2(\varphi_1 + \varphi_2) - (\varepsilon_{r3} - \varepsilon_{r1}) \sin 2\varphi_1} \quad (5.1)$$

где $\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r3}$ – деформации в точках 1, 2, 3, равноудаленных от центра зондирующего отверстия, брались из результатов численного расчета рассматриваемой кольцевой области; φ_1, φ_2 – полярные углы между точками 1 и 2, 2 и 3 соответственно.

Для симметричной розетки ($\varphi_1 = \varphi_2 = 120^\circ$) при различном удалении от зондирующего отверстия получены следующие результаты: $r = 1,5R$; $\theta = 1^\circ$; $r = 2R$; $\theta = 1,5^\circ$. Таким образом, предлагаемый способ вычисления внутренних напряжений удовлетворительно определяет величину и направление главных напряжений σ_1, σ_2 .

Экспериментально определялись внутренние напряжения в образце из сплава Д16Т ($E = 7,1 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0,31$) шириной 19,8 мм, толщиной 1,35 мм и длиной 250 мм, подвергнутом одноосному растяжению усилием $P = 3,25$ кН. Ввиду того, что при решении практических задач заранее направление главных напряжений неизвестно, на поверхность образца наклеивали ортогональный растр частотой $\Psi_{x_1y_1} = 1280$ мм $^{-1}$, линии которого были повернуты на некоторый угол $\xi = 45^\circ$ по отношению к продольной оси образца. Отражательные голограммы записывались методом двух экспозиций. Сверление отверстия радиусом $R = 2,2$ мм производилось между экспозициями. На фиг. 4 приведена фотография картины полос, наблюдаемой в отраженном свете в плоскости x_1oz . Угол наблюдения, определяемый частотой используемого раstra и отсчитываемый от оси x_1 , равен 51° . В результате многолучевой интерференции полосы получаются более узкими, что облегчает обработку интерферограммы и косвенно повышает точность измерений. Особенно это заметно на контуре отверстия. Картина полос, наблюдаемая по нормали, показала отсутствие вторых пластических деформаций после высверливания отверстия [16]. Направление главных напряжений определяли по формуле (5.1). Для симметричной розетки ($\varphi_1 = \varphi_2 = 120^\circ$) при $r = 3,3$ мм ($r = 1,5R$) значения деформаций $\varepsilon_{r1}, \varepsilon_{r2}, \varepsilon_{r3}$ соответственно равны $-7,0 \cdot 10^{-4}, -12,3 \cdot 10^{-4}, -0,3 \cdot 10^{-4}$, что соответствует отклонению ориентации σ_1 от истинного значения на 4° . Для данных, снятых по контуру отверстия ($r = R = 2,2$ мм) угол θ отличается от истинного на 8° . Увеличение погрешности в последнем случае можно объяснить неточностью съема экспериментальной информации по контуру отверстия в интервале углов $150^\circ < \varphi < 270^\circ$. В этой области интерференционные полосы почти касательны к отверстию, что затрудняет определение их центров.

В настоящем примере были получены следующие внутренние напряжения вдоль осей x_1, y_1 , совпадающих с линиями рабочего раstra: $\sigma_{x1} = 62$ МПа, $\sigma_{y1} = 58$ МПа, $\tau_{x_1y_1} = -59$ МПа. Переходя к напряжениям по площадкам, повернутым на угол $\xi = 45^\circ$, получили $\sigma_x = 120$ МПа, $\sigma_y = 2$ МПа, $\tau_{x_1y_1} = 2$ МПа. Исходные напряжения составляли $\sigma_x = 121,6$ МПа, $\sigma_y = 0$ МПа, $\tau_{x_1y_1} = 0$ МПа. На фиг. 3, б представлены изолинии поля U в пластине, а на фиг. 5 — эпюры напряжений σ_x (МПа) в диске по кольцам с радиусами $r = 0,3R, r = R$. Вид эпюр хорошо согласуется с исходными условиями задачи (одноосное растяжение пластины).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов А. А., Бобрик А. И., Морозов В. К., Чернышев Г. Н. Определение остаточных напряжений при помощи создания отверстий и голографической интерферометрии // Изв. АН СССР. МТТ. 1980. № 2. С. 182—189.
2. Лобанов Л. М., Касагкин Б. С., Пивторак В. А., Андрущенко С. Г. Определение остаточных напряжений методом голографической интерферометрии с использованием одной голограммы // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271. № 3. С. 557—561.
3. Гришанов А. Н., Де С. Т., Денежкин Е. Н., Хандогин В. А. Голографическая регистрация остаточных напряжений // Динамика и прочность летательных аппаратов. Новосибирск: НЭТИ, 1986. С. 127—130.
4. Nelson D. V., McCricker J. T. Residual-stress determination through combined use of holographic interferometry and blinedhole drilling // Exper. Mech. 1986. V. 26. N. 4. P. 371—378.
5. Ke J., Ma Y., Zhao C. Measurement of residual stresses by modern optical methods // Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1985. V. 599. P. 216—223.
6. Бакулин В. Н., Рассоха А. А. Метод конечных элементов и голографическая интерферометрия в механике композитов. М.: Машиностроение, 1987. 311 с.
7. Рекомендации по применению голографической и лазерной интерферометрии в строительной физике. М.: Стройиздат, 1987. 46 с.
8. Жилкин В. А., Герасимов С. И. О возможности изучения деформированного состояния изделий с помощью накладного интерферометра // Ж. техн. физики. 1982. Т. 52. № 10. С. 2079—2085.
9. Жилкин В. А., Попов А. М. Голографический муаровый метод // Заводская лаборатория. 1979. № 11. С. 1039—1042.
10. Жилкин В. А., Косенков В. К., Шевцов Р. Г. Использование кольцевой статической неопределимой балки для аппроксимации функции порядков в оптических методах // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1985. № 6. С. 134—137.
11. Жилкин В. А., Зиновьев В. В. Расшифровка интерференционных картин в методе голографического муара // Ж. техн. физики. 1986. Т. 56. № 1. С. 113—119.

12. *Арбузов В. М., Буханова Н. М., Козинцев В. М.* Исследование остаточных напряжений и механических свойств сварных соединений сплава 01570 // Технологические остаточные напряжения: Материалы 3-го Всесоюз. симпоз. М.: Ин-т проблем механики АН СССР. 1988. С. 25–29.
13. *Тимошенко С. П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1975. 575 с.
14. *Островский Ю. И., Щепинов В. П., Яковлев В. В.* Голографические интерференционные методы измерения деформаций. М.: Наука, 1988. 247 с.
15. *Биргер И. А.* Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 232 с.
16. *Антонов А. А., Морозов В. К., Чернышев Г. Н.* Измерение напряжений методом голографирования возмущенной поверхности тела // Изв. АН СССР. МТТ. 1988. № 3. С. 185–189.

Новосибирск

Поступила в редакцию
13.III.1989