

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный
институт имени академика С.П.Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ
ПОВЕРХНОСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Утверждено редакционным
советом института в
качестве методических
указаний к проведению
лабораторных работ

Методические указания знакомят с условиями формирования остаточных напряжений, методами их определения; устройством и принципом работы аппаратуры для измерения деформаций в процессе непрерывного химического или электрохимического полирования; методикой расчета остаточных напряжений по известным зависимостям деформаций образцов; с составами электролитов, применяемых для травления различных материалов.

Методические указания предназначены для студентов факультета "Двигатели летательных аппаратов" и слушателей факультета повышения квалификации инженерно-технических работников.

Авторы-составители: Ф.П.Уривский, В.Н.Трусов, В.И. Егоров

Рецензенты: М.К.К л е б а н о в, А.В.Т а р а с о в

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Ц е л ь р а б о т ы: изучение методов исследования остаточных поверхностных напряжений; приобретение навыков проведения исследовательской работы.

Теоретические основы эксперимента

На эксплуатационные свойства деталей машин наряду с геометрическими параметрами большое влияние оказывает физико-механическое состояние поверхностного слоя, в частности, остаточные напряжения, которые влияют на точность обработки, циклическую прочность, коррозионную стойкость. Согласно современным представлениям остаточные напряжения сжатия являются полезными (увеличивается усталостная и длительная прочность, повышается износостойкость деталей), а растягивающие - вредными.

Остаточными напряжениями называют такие внутренние напряжения, которые сохраняются в детали при снятии внешней нагрузки. Различают напряжения I, II, III рода. Напряжения первого рода имеют макроскопический характер, уравниваются они в пределах всего объема детали или большей части его. По своему действию напряжения первого рода приравняются к рабочим напряжениям (статическим или динамическим), действующим при эксплуатации детали, и, алгебраически суммируясь с рабочими, они оказывают благоприятное или вредное влияние на работоспособность детали.

Напряжения второго и третьего рода представляют собой местные кристаллические напряжения, охватывающие объем одного или нескольких зерен металла.

Возникновение остаточных напряжений в поверхностном слое при механической обработке объясняется следующими основными причинами.

В результате пластической деформации происходит увеличение

удельного объема и изменение размеров зерен в том или ином направлении пластически деформированного поверхностного слоя. Этим изменениям препятствуют связанные с ним недеформированные нижележащие слои, в результате чего в наружном слое возникают сжимающие или растягивающие остаточные напряжения.

Выделяющееся в зоне резания тепло мгновенно нагревает тонкие поверхностные слои металла до высоких температур. Металл в верхних нагретых слоях, стремясь к увеличению своего объема, встречает противодействие со стороны нижележащих слоев, что приводит к образованию напряжений сжатия. В случае возникновения напряжений, превышающих предел текучести данного металла, в поверхностном слое произойдет термопластическая деформация. При охлаждении объем верхних нагретых слоев металла стремится уменьшиться, однако его сжатие препятствуют нижележащие слои холодного металла. Вследствие этого в поверхностном слое образуются остаточные напряжения растяжения, а в нижнем - сжатия.

При обработке металлов, склонных к фазовым превращениям, нагрев зоны резания вызывает структурные превращения, связанные с объемными изменениями металла. В этом случае в слоях металла со структурой, имеющей больший удельный объем, развиваются напряжения сжатия, а в слоях со структурой меньшего удельного объема - остаточные напряжения растяжения.

В настоящее время остаточные поверхностные напряжения определяются в основном двумя методами - рентгеноструктурным и механическим.

Сущность рентгеноструктурного метода заключается в измерении разности параметров кристаллической решетки исследуемого металла после механической обработки и в отожженном состоянии.

Преимуществами рентгеноструктурного метода являются: возможность определения напряжений без разрушения детали, возможность измерения напряжений в деталях сложной формы, локальность.

Механический метод основан на определении зависимости между напряжениями и деформациями, полученной академиком Н.Н.Давиденковым, и заключается в измерении деформации образца при послойном или непрерывном удалении поверхностных напряженных слоев с последующим расчетом напряжения.

Преимуществом этого метода, который нашел наибольшее распространение в лабораторных условиях, является возможность быстрого получения эсперы остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя и простота оборудования.

Задачи исследования

I. Изучение методики механического метода определения напряжений

Согласно зависимостям акад. Н.Н.Давиденкова, тангенциальные σ_{τ} (в направлении вектора скорости) и осевые σ_0 (перпендикулярно вектору скорости) остаточные напряжения находятся из выражений:

$$\sigma_{\tau} = \sigma_{\tau_1} + \sigma_{\tau_2} + \sigma_{\tau_3};$$

$$\sigma_0 = \sigma_{0_1} + \sigma_{0_2} + \sigma_{0_3},$$

где σ_{τ_1} и σ_{0_1} - напряжения, снимаемые при вырезке (или разрезке) образца;

σ_{τ_2} и σ_{0_2} - напряжения, существующие в удаляемых (травлением или электрополировкой) слоях;

σ_{τ_3} и σ_{0_3} - поправки, учитывающие изменения напряжений в удаляемых слоях вследствие удаления всех предыдущих слоев.

Исследования показывают, что составляющие σ_{τ_1} , σ_{0_1} , σ_{τ_3} , σ_{0_3} малы по своему абсолютному значению и составляют не более 1-3% от общей величины остаточных напряжений. Поэтому напряжениями σ_{τ_1} , σ_{0_1} , σ_{τ_3} , σ_{0_3} пренебрегают, принимая за остаточные измеренные напряжения значения σ_{τ_2} и σ_{0_2} .

Формулы для расчета тангенциальных напряжений на кольцевых образцах и осевых - на плоских применительно к приборам и аппаратуре, разработанной в лаборатории № 3 при кафедре резания имеют вид:

$$\sigma_{\tau} = \frac{E(a-\delta)^2}{3[D-(a+\delta)]^2} \frac{dD}{d\delta}, \quad (I)$$

где E - модуль упругости, МПа;

a - толщина образца, мм;

δ - толщина травленного слоя, мм;

$\frac{D}{dD}$ - наружный диаметр образца, мм;
 $\frac{dD}{d\delta}$ - приращение диаметра кольца к толщине травленного слоя

$$\sigma_0 = \frac{E(a-\delta)^2}{3l^2} \frac{df}{ds}, \quad (2)$$

где l - длина исследуемого участка, мм;
 $\frac{df}{d\delta}$ - приращение прогиба к толщине снятого слоя.

Следует отметить, что при механической обработке (при резании)

металлов, когда поверхностный слой подвергается интенсивной пластической деформации и действию температуры, в детали образуется объемно-напряженное состояние. Однако в силу малой толщины поверхностного слоя напряженное состояние с достаточной точностью может быть принято двухосным (плосконапряженным). При двухосном напряженном состоянии остаточные осевые напряжения, полученные на плоских образцах (вырезанных из втулок), и тангенциальные напряжения, определенные на кольцах, не будут характеризовать первоначальные (истинные) напряжения. Это обусловлено тем, что после вырежки образцов остаточные напряжения по боковым поверхностям вследствие "краевого эффекта" снимаются и напряженное состояние в них становится одноосным: в стержневых образцах напряжения будут действовать лишь вдоль оси, а в кольцевых - по окружности. Поэтому действительные остаточные осевые и тангенциальные напряжения должны определяться с учетом их взаимного влияния, т.е.

$$\sigma_r^g = \frac{1}{1-\mu^2} [\sigma_r + \mu \sigma_0];$$

$$\sigma_0^g = \frac{1}{1-\mu^2} [\sigma_0 + \mu \sigma_r],$$

где μ - коэффициент Пуассона ($\mu = 0,3$).

2. Определение тангенциальных остаточных напряжений

При травлении круглых образцов кольцо I (рис.1) после обработки и разрезки по образующей закрепляют в держателе 4. Предварительно на кольце укрепляют лапку 2. Кольцо фиксируют таким образом, чтобы после его укрепления под действием шарика, смонтированного в лапку, пластинчатая пружина 3 с наклеенными тензосенсорными датчиками получила прогиб в месте касания, примерно равный I мм. В таком положении держатель 4 с помощью двух винтов укрепляют в корпусе 6. Внутренняя цилиндрическая поверхность корпуса армирована сви-

цовой пластиной 7 (катод). Токпроводящие штанги 5 связаны с держателем 4 и пластиной 7. Штангу, связанную с держателем, с помощью шины подключают к положительному полюсу, а штангу, связанную с пластиной 7, - к отрицательному. Перед тем как держатель с кольцом прикрепляется к корпусу, все поверхности кольца, кроме нижней половины по наружному или внутреннему диаметру, которая должна травиться, покрывают хлорвиниловым лаком.

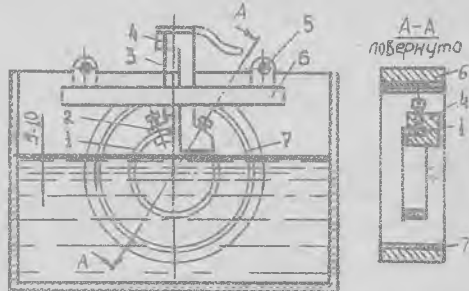
В процессе электрополирования, вследствие удаления слоев с остаточными напряжениями, кольцо деформируется. Деформация кольца передается на пластинчатую пружину (балку) 3, прогиб которой фиксируется тензодатчиками, наклеенными на пластину, и электрической схемой установки, выполненной на базе прибора ЭПН-09МЗ. Этот прибор способен регистрировать на диаграммной бумаге изменения размеров нескольких колец одновременно.

Для примера на рис. 2 показана зависимость изменения диаметра кольца ΔD с течением времени травления $\Delta \tau$ (кривая деформации), записанная на диаграммной ленте. Здесь же показан

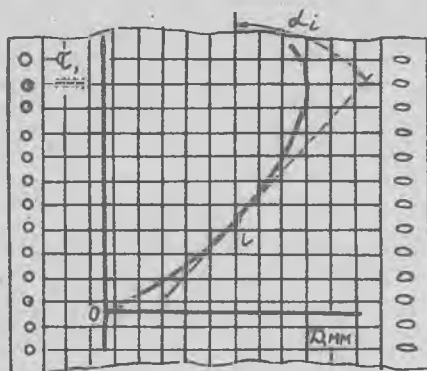
угол α , тангенс которого определяет значение $\frac{dD}{d\sigma}$ в данной точке, соответствующей определенной глубине травленного слоя. Значение $\frac{dD}{d\sigma}$ будет зависеть также от чувствительности прибора K_1 , скорости травления v_a и скорости перемещения диаграммной ленты v_l .

Чувствительность (дену деления) прибора определяют при тарировке. Пример тарировочного графика представлен на рис. 3, из которого видно, что перемещение балочки на ΔB_d вызывает перемещение указателя прибора вдоль шкалы на ΔB_n , т.е. $K_1 = \frac{\Delta B_d}{\Delta B_n}$ ($K_1 \approx 2$ мм/мм).

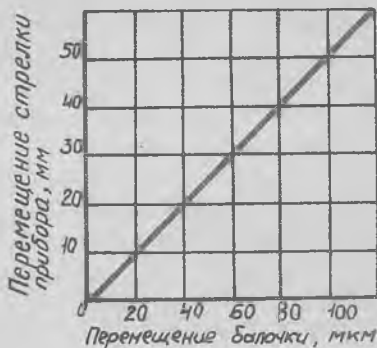
Скорость травления v_a принимается постоянной при стравливании слоя толщиной σ за время $\Delta \tau$, т.е. $v_a = \frac{\sigma}{\Delta \tau}$ [мм/мин], откуда $\sigma = v_a \Delta \tau$ или $d\sigma = v_a d(\Delta \tau)$.



Р и с. 1. Схема установки для определения остаточных напряжений на круглых образцах



Р и с. 2. Пример записи кривой деформации кольцевого образца



Р и с. 3. Тарировочный график балочка-прибор ЭШ-ОМЗ

С учетом скорости перемещения диаграммной ленты $\Delta \tau = K_2 \Delta \tau_u$, где $\Delta \tau_u$ - перемещение ленты за время $\Delta \tau$, мин, $\Delta \tau$ - время, за которое стравлен слой δ , мин,

$$K_2 = \frac{\Delta \tau}{\Delta \tau_u} = \frac{1}{4} \left[\frac{\text{мин}}{\text{мин}} \right],$$

таким образом $d\delta = K_2 d(\Delta \tau_u) v_a$.

Условная схема прогиба кольца при травлении приведена на рис.4. Согласно этой схеме, в расчетную формулу σ_r входит величина ΔA (ΔD), а непосредственно измеряется величина ΔB_g .

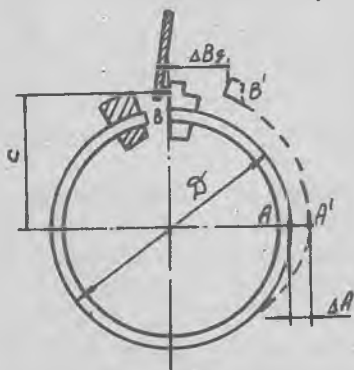
Поэтому нужно знать соотношение между ними, а также связь перемещения балочки с перемещением указателя прибора, т.е. необходимо учесть чувствительность прибора. Тогда

$$\Delta A = \frac{\Delta B_g}{\pi C D + 1} = \Delta B_g \frac{D}{\pi C + D},$$

так как $\Delta B_g = K_1 \Delta B_l$, то

$$\Delta D = \Delta A = \frac{D}{\pi C + D} K_1 \Delta B_l.$$

Окончательно формула для расчета тангенциальных остаточ-



Р и с. 4. Условная схема прогиба круглого образца

ных напряжений примет следующий вид:

$$\sigma_{\tau} = \frac{E(\alpha - \delta)^2}{3[D - (\alpha + \delta)]^2} \frac{D}{\pi C + D} \frac{K_1}{K_2} \frac{1}{r_d} t g \alpha,$$

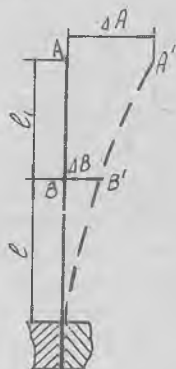
где $t g \alpha = \frac{\Delta B_d}{\Delta \tau_d}$ - тангенс угла наклона касательной, проведенной к кривой деформации в данной точке на диаграммной бумаге.

Знак остаточных напряжений определяется следующим способом: если в процессе травления (или электрополирования) диаметр кольца уменьшается, то это означает, что в нем были растягивающие остаточные напряжения, если увеличивается - сжимающие.

Напряжения σ_{τ} рассчитываются для нескольких (8-10) характерных точек кривой деформации, затем строится эпюра остаточных напряжений по глубине стравленного слоя $\sigma_{\tau} = f(\delta)$ (рис.5).



Р и с. 5. Эпюры тангенциальных остаточных напряжений



Р и с. 6. Принципиальная схема измерения деформаций на плоском образце

3. Определение осевых остаточных напряжений

Принципиальная схема измерения деформаций образцов при электрополировании показана на рис.6, из которого следует, что в расчетную формулу (2) входит величина $\Delta \bar{A} (\Delta f)$ - приращение прогиба свободной балки.

Измеряется перемещение ΔB_d свободного конца заземленной балки. Связь между ними на основании положений сопромата можно выразить в виде $f = \Delta A = \Delta B_d \frac{l}{4(\alpha l_1 + l)}$.

Принимая
$$K_1 = \frac{\Delta B_a}{\Delta B_u};$$

$$K_2 = \frac{\Delta \tau}{\Delta \tau_u} = \frac{d\sigma}{d(\Delta \tau_u) v_a},$$

формулу для подсчета осевых остаточных напряжений можно представить в виде

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{E(a-\bar{\sigma})^2}{3l(xl+l)} \frac{K_1}{K_2} \frac{1}{v_a} \operatorname{tg} \alpha_u,$$

где $\operatorname{tg} \alpha_u$ - тангенс угла наклона касательной, проведенной к кривой деформации в данной точке на диаграммной ленте.

Если в исследуемом слое были сжимающие остаточные напряжения, то после их снятия образец прогнется в сторону обработанной поверхности, если растягивающие - в противоположную.

4. Исследование влияния режимов резания и геометрии инструмента на остаточные напряжения

В работе предусмотрено исследование влияния скорости, подачи, переднего угла и радиуса при вершине на остаточные напряжения. При определении влияния того или иного параметра на остаточные напряжения остальные условия обработки должны быть постоянными. Необходимо отметить, что большое влияние на изменение остаточных напряжений оказывает износ режущего инструмента. Поэтому все эксперименты нужно проводить на режиме установившегося износа ($k_3 = 0,1 \dots 0,2$ мм). Наиболее ярко изменение остаточных напряжений проявляется при изменении переднего угла. Поэтому в лабораторной работе рекомендуется проводить эксперимент при обточке колец с переменным передним углом: $\gamma = +10, 0, -10^\circ$.

Исследования проводятся на кольцах и пластинах, вырезанных из ступок диаметром 50 мм, толщиной 2,5...3,0 мм при длине пластины порядка 100 мм. При измерении геометрии образца диаметр и толщина определяются микрометром с точностью до 0,01 мм, толщина стравленного слоя измеряется длинномером с точностью до 0,001 мм или расчетным путем по изменению веса.

Для повышения достоверности результатов исследований остаточные напряжения определяются на трех кольцах и трех пластинах, обработанных на одном режиме.

Непрерывное удаление поверхностных слоев для измерения деформации образцов производится или анодным растворением, или травлением. При анодном растворении жаропрочных сплавов и сталей используется электролит следующего состава, %:

Ортофосфорная кислота	- 65-70
Серная кислота	- 10-15
Хромовый ангидрид	- 5
Вода	- остальное

Плотность тока составляет около $(1...1,5) \cdot 10^3$ а/м²

При травлении титановых сплавов следует применять электролит следующего состава, %:

Азотная кислота	- 25-45
Плавиковая кислота	- 1-2
Вода	- остальное

Авторы-составители: Федор Прокофьевич Урывский,
Владимир Николаевич Трусов,
Валерий Иванович Егоров

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Методические указания к лабораторной работе № 3

Редактор Э.А.Г р я з н о в а
Техн. редактор Н.М.К а л е н ю к
Корректор Е.Г.Ф и л и п п о в а

Подписано в печать 13.06.83 г. Формат 60x84 I/16.
Бумага оберточная белая. Печать оперативная.
Усл.п.л. 0,69. Уч.-изд.л. 0,6. Т. 500 экз. Заказ № 3920
Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С.П.Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Типография им. В.П.Мяги, г. Куйбышев, ул. Венцека, 60.