

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА ПРИ ЕГО РАДИАЛЬНОМ СЖАТИИ

Ю. С. БОГОМОЛОВ, Л. М. СЕДОКОВ

(Представлено научным семинаром кафедры сопротивления материалов)

Важнейшей механической характеристикой материала является его прочность на растяжение. Определение этой характеристики применительно к хрупким материалам (чугун, бронза, камень, бетон, хрупкие пластические массы и др.) весьма затруднено. Эти трудности увеличивают разброс результатов испытаний для одного и того же материала в одних и тех же условиях, что приводит к существенной неопределенности характеристики прочности испытываемого материала.

В целях устранения значительного разброса результатов испытаний существующие стандарты предусматривают применение образцов сложных конфигураций с предопределенным местом разрушения и другие меры, которые вносят свои искажения и погрешности. Так, например, при использовании образцов с предопределенным местом разрушения в виде «восьмерок» результаты испытаний не будут соответствовать линейному напряженному состоянию металла в зоне разрушения, когда испытание осуществляется при помощи образцов с постоянным поперечным сечением.

Техника изготовления и условия испытаний образцов на осевое растяжение по существующим стандартам отличаются определенной сложностью. ГОСТ 4649-50 на пластические массы предусматривает образцы сложной формы с прямоугольными головками, которые выкружками сопряжены с рабочей частью образца. Для установки таких образцов в захваты испытательной машины требуются специальные зажимы.

Кроме того, вносит искажение возможная внецентренность приложения растягивающей силы. Применительно к пластичным материалам это не имеет существенного значения, так как предшествующая разрушению пластическая деформация сокращает эксцентриситет действующей силы.

Все это вызывает необходимость определения прочности материалов на разрыв косвенными методами. Однако существующие косвенные методы определения указанной характеристики в свою очередь имеют недостатки, мало теоретически обоснованы, а получаемые по этим методам результаты значительно зависят от условий испытаний. Поэтому необходимы дальнейшие исследования по разработке методов надежного определения прочности на разрыв хрупких материалов.

В лаборатории сопротивления материалов Томского политехнического института проведена работа по определению прочности на разрыв чугуна [1, 2] и хрупких пластмасс путем сжатия цилиндрических образцов по радиусу [3]. Этот метод применяется при испытании бетона [4].

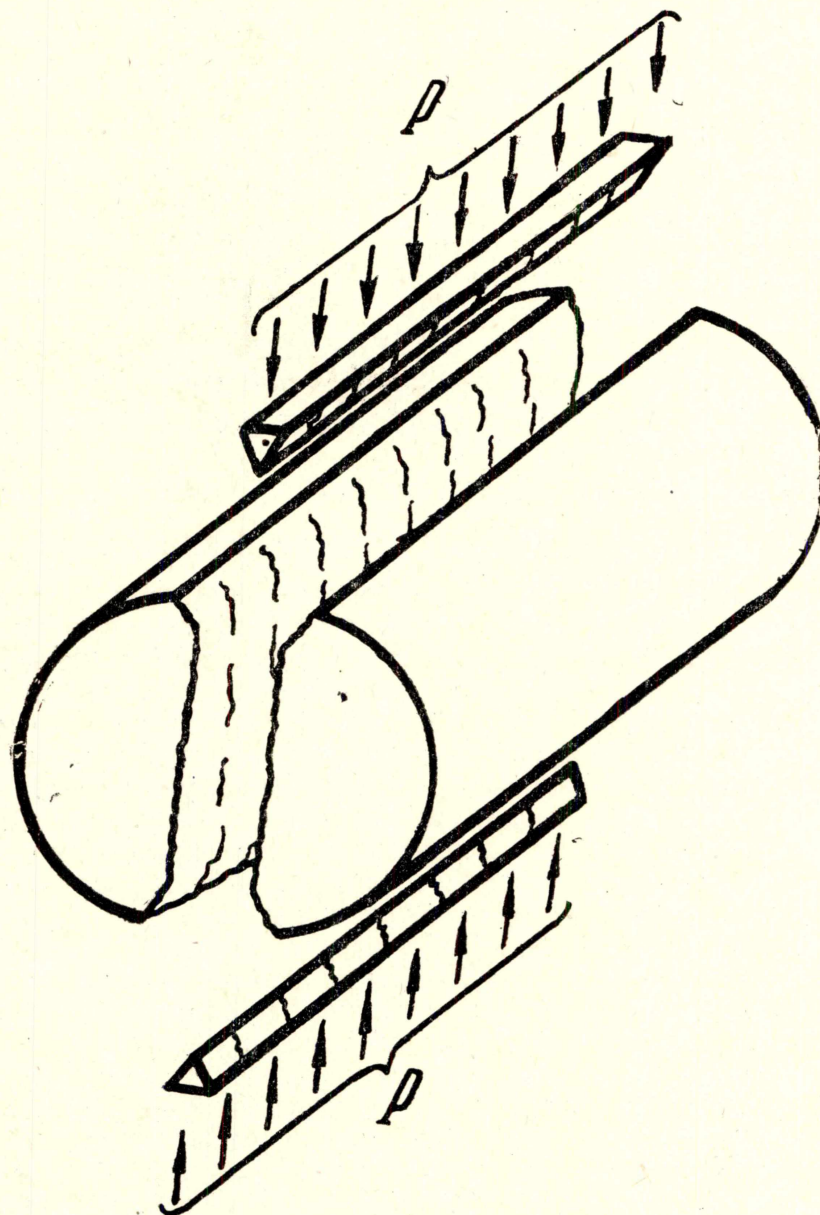


Рис. 1. Разрушение цилиндрического образца из хрупкого материала при радиальном сжатии.

Сущность предложенного метода определения предела прочности на разрыв хрупких материалов заключается в том, что цилиндрический образец подвергается радиальному сжатию на обычной испытательной машине с регистрацией разрушающей нагрузки. В этом случае разрушение образца происходит по диаметральному сечению, образец как бы раскалывается на две половинки (рис. 1). Часто вдоль образующих, по которым прикладывается сила, выкалываются треугольные призмы.

Предел прочности материала в этом виде механических испытаний может быть определен по формуле

$$\sigma_{\text{нч}} = A \frac{P_{\text{max}}}{dl},$$

здесь P_{\max} — максимальная сила при испытании, d, l — диаметр и длина образца, A — безразмерный коэффициент.

Величина безразмерного коэффициента подлежит тщательному теоретическому и экспериментальному определению.

Можно предположить, что разрушение цилиндрического образца при его радиальном сжатии происходит в результате действия естественных клиньев, которые появляются вдоль образующих от местных перенапряжений вблизи приложения силы.

Приняв угол при вершине образующихся клиньев равным 90° , можно получить A равным 0,5. Как показали проведенные эксперименты, по чугуну и хрупким пластмассам [2, 3] этот коэффициент колеблется в пределах от 0,7 до 0,9. Увеличение коэффициента A , вероятно, связано с изменением угла при вершине клиньев и с уменьшением диаметрального сечения за счет предварительного выкалывания клиньев. Здесь также могло сказаться трение по граням клиньев.

Величину безразмерного коэффициента A можно получить на основании решения задачи о распределении напряжений в диске Герца методами теории упругости. Известно [5], что растягивающие напряжения на площадках, совпадающих с плоскостью действия силы при радиальном сжатии диска, определяются по формуле

$$\sigma_x = \frac{2}{\pi} \frac{P}{dl} = \text{const.}$$

Следовательно, распространяя действие закона Гука при радиальном сжатии образца на хрупкие материалы вплоть до разрушения,

получим $A = \frac{2}{\pi} \approx 0,64$.

Все это подтверждает необходимость исследований по выявлению параметров, определяющих изменение безразмерного коэффициента A .

С этой целью было проведено экспериментальное изучение распределения напряжений в различных точках поперечного сечения диска Герца в широком диапазоне изменения величины сжимающей силы. Эксперимент проводился на диске из органического стекла диаметром 40 см и толщиной 4,5 см. На радиусе 20 см измерялись напряжения в 10 точках, т. е. датчики были приклеены с шагом 2 см. Для оценки плосконапряженного состояния в каждой исследуемой точке располагались два датчика по направлениям главных напряжений σ_x и σ_y . На диск были приклеены тензодатчики с базой 5 мм в направлении вертикального и горизонтального диаметра таким образом, что с одной стороны диска их направление соответствовало σ_x , а с другой — σ_y . Тензодатчики приклеивались дихлорэтановым клеем, который состоит из 100 весовых частей дихлорэтана и 3—5 частей стружки органического стекла. Поверхность диска, к которой приклеиваются тензодатчики, тщательно зачищается мелкой наждачной бумагой, причем диски располагаются перпендикулярно к оси датчика. Обезжиривание производится ацетоном и спиртом.

При наклейке смазываются дихлорэтановым клеем поверхность датчика и поверхность диска в исследуемых точках. После сушки в течение 3—5 минут приклеиваемый датчик и диск вновь смазываются и датчик тотчас накладывается на диск. После ориентации оси датчика в нужном направлении датчик покрывается триацетатной пленкой. Резиновым валиком или рукой выжимаются капли клея из-под датчика, и он придавливается весом 400—500 граммов. Под грузом приклеенный датчик выдерживается при комнатной температуре в течение суток.

Измерения показаний датчиков производились при помощи высокостабильной 40-точечной тензометрической установки ВСТ-3 Уральского политехнического института.

При расчете напряжений по показаниям тензодатчиков, имеющих малую базу, при плоском напряженном состоянии возникают трудности вследствие искажения величины деформации исследуемой детали. Это искажение измеряемой величины деформации объясняется механическими и электрическими несовершенствами проволочных датчиков петлевого типа. Кроме того, необходимо учитывать зависимость соотношения главных напряжений от координат точек, где определяются напряжения.

Так, А. И. Гугенбергер [6] при исследовании некоторых случаев плоского напряженного состояния показывает, что коэффициент искажения деформации петлевыми датчиками изменяется весьма существенно и лежит в пределах от 0,35 до 2,7.

Точность расчетов по методике и по формулам Г. А. Митиченко [7] зависит от точности определения характеристик датчиков, коэффициента тензочувствительности проволоки, модуля упругости материала и коэффициента поперечной деформации, что при практическом применении дает значительную неопределенность конечных результатов.

Предварительная тарировка датчиков при линейном напряженном состоянии по методике, разработанной на кафедре сопротивления материалов Томского политехнического института, позволяет учесть погрешности при измерении, вносимые механическими и электрическими несовершенствами проволочных датчиков. Сущность предлагаемой методики состоит в одновременной тарировке двух датчиков при линейном растяжении (сжатии). Тарировка проводилась на балке равного сопротивления. Один из датчиков наклеивается вдоль растягивающих (сжимающих) напряжений, а другой — перпендикулярно первому. Датчики тарировались таким образом, что находились один раз на растянутых волокнах, а другой раз — на сжатых, для чего тарировочная балка с наклеенными датчиками перевертывалась. На рис. 2 приведен тарировочный график для датчиков с базой 5 мм. Контрольная тарировка двух датчиков на пластине, подвергнутой непосредственному осевому растяжению, практически подтвердила результаты, полученные при тарировке на балке равного сопротивления.

Если обозначить через N_1 показания регистрирующего прибора, подключенного к датчику 1, направление оси решетки которого совпадает с направлением действующих напряжений при осевом растяжении (сжатии), то его работа определяется углом α . Обозначая через N_2 показания регистрирующего прибора, подключенного к датчику 2, ось решетки которого перпендикулярна действующим напряжениям, определяем работу этого датчика углом β .

Рассматривая плоское напряженное состояние как сумму двух линейных (рис. 2), можно графически определить значение напряжений σ_1 и σ_2 . Датчик 1 при $\sigma_2 = 0$ дает показание, соответствующее отрезку AB , но одновременное действие напряжения σ_2 вызывает уменьшение показания на величину, равную отрезку $LM = GL = EB$.

Таким образом, при расчете напряжений при плоском напряженном состоянии следует считать показание датчика 1 соответствующим отрезку AE , а датчика 2 — отрезку $ДН$. Тогда расчетные формулы имеют вид

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \beta} \left(N_1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} N_2 \right), \\ \sigma_2 &= \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \beta} \left(N_2 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} N_1 \right).\end{aligned}\quad (1)$$

Имея результаты тарировки датчиков с базой 5 мм

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{N_1}{\sigma_1} = 6,15, \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{N_2}{\sigma_2} = 2,4,$$

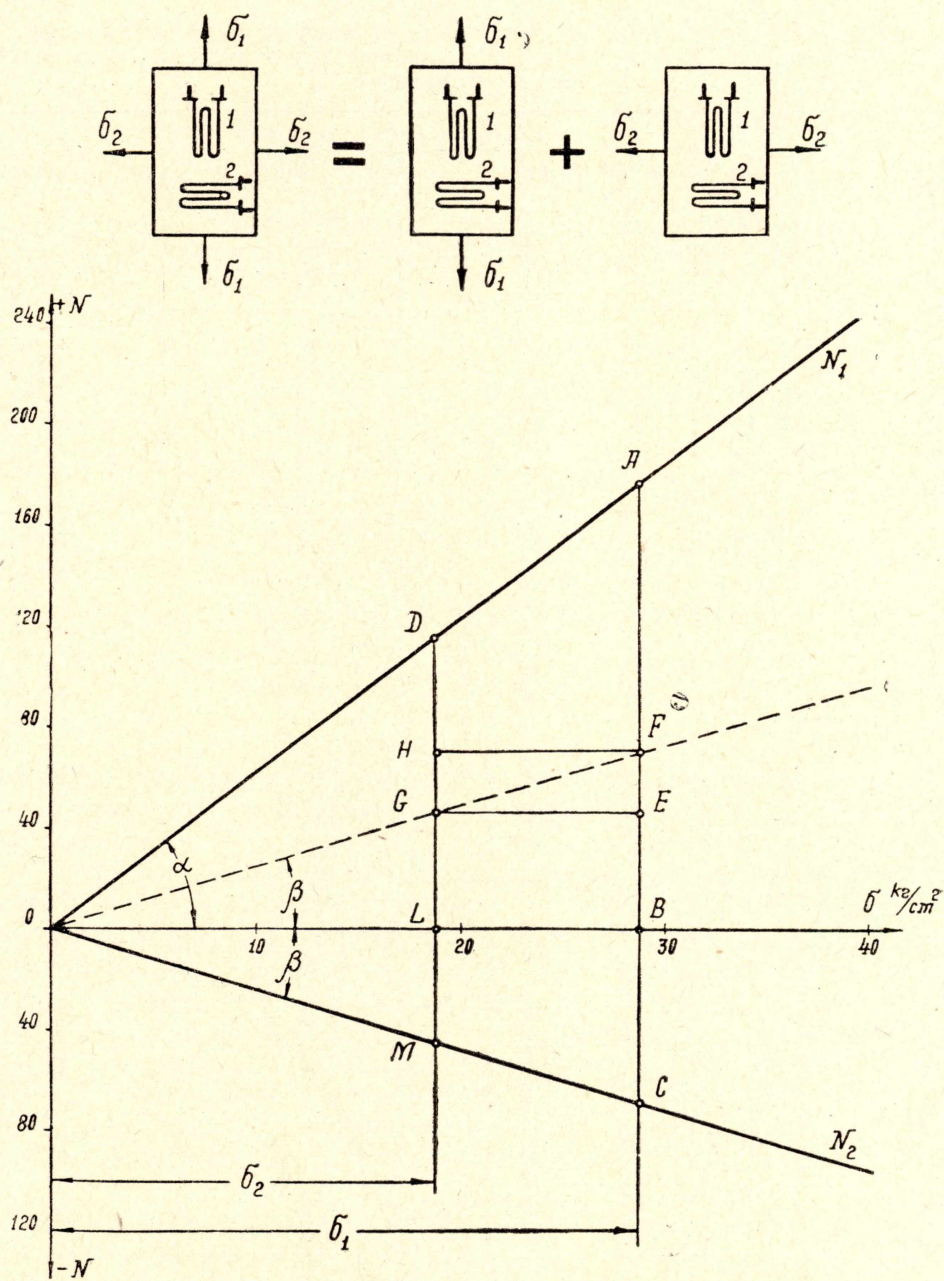


Рис. 2. Тарировочный график для датчиков с базой 5 мм: схема плоского напряженного состояния как сумма двух линейных.

получаем рабочие формулы

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 0,192 N_1 - 0,075 N_2, \\ \sigma_2 &= 0,192 N_2 - 0,075 N_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Приведенная методика определения напряжений при плоском напряженном состоянии практически с любым соотношением главных напряжений позволила обработать результаты опытов сжатия диска по

радиусу между параллельными плитами пресса нагрузкой от 200 до 2000 кг. Данные о величине напряжений σ_x , возникающих в сжатом диске по вертикальному и горизонтальному радиусам, показаны в таблице для нагрузки 1200 кг.

Т а б л и ц а

Сравнение распределения напряжений σ_x в сжатом диске, полученных экспериментально, с результатами аналитического расчета по методам теории упругости

Расстояние от центра диска в см	Напряжение σ_x в кг/см ²			
	вертикальный радиус		горизонтальный радиус	
	вычислено методами теории упругости	определено экспериментально	вычислено методами теории упругости	определено экспериментально
0	4,25	4,15	4,25	4,15
2	4,25	4,45	4,10	3,90
4	4,25	4,49	3,61	3,68
6	4,25	4,05	2,96	2,81
8	4,25	4,00	2,23	2,18
10	4,25	4,20	1,53	1,43
12	4,25	3,95	0,95	0,91
14	4,25	4,20	0,50	0,51
16	4,25	4,05	0,20	0,17
18	4,25	25,1	0,05	0,03

На рис. 3 а и 3 б приведены эпюры распределения нормальных напряжений σ_y для вертикального и горизонтального радиусов диска, построенные по данным эксперимента и теории упругости. Вследствие симметрии диска эпюры выполнены для четверти диска *OAB*.

Сплошной линией показана эпюра напряжений, определенная методами теории упругости. Кружочками нанесены величины напряжений, подсчитанные по формулам (2). Из рис. 3 видно, что эти точки практически ложатся на кривую, построенную по данным теории упругости. Крестиками показаны напряжения, определенные в тех же условиях опыта по тем же показаниям датчиков, но подсчитанные обычным путем при предварительной тарировке одного тензодатчика. По данным точкам построены эпюры распределения напряжений в виде пунктирной кривой. В этом случае расхождения с эпюрой, выполненной по данным теории упругости, достигают 10%.

Данные опытов говорят о том, что экспериментальное определение распределения напряжений по поперечному сечению цилиндра, сжимаемого радиальными силами, в основном подтверждает расчет этих напряжений методами теории упругости. Значительное расхождение между экспериментом и расчетом имеет место в зоне, близкой к месту приложения нагрузки, т. е. для точек, наиболее удаленных от центра диска.

Это объясняется тем обстоятельством, что в действительности радиальная сила распределена по очень малым, но имеющим конечные размеры площадкам. С увеличением нагрузки увеличиваются и размеры этих площадок, что ведет к дальнейшему расхождению эксперимента с теоретическими вычислениями. Исследования круглого диска оптическим методом [5] также показывает отклонение опытных данных от расчетных в зоне, близкой к месту приложения радиальной силы.

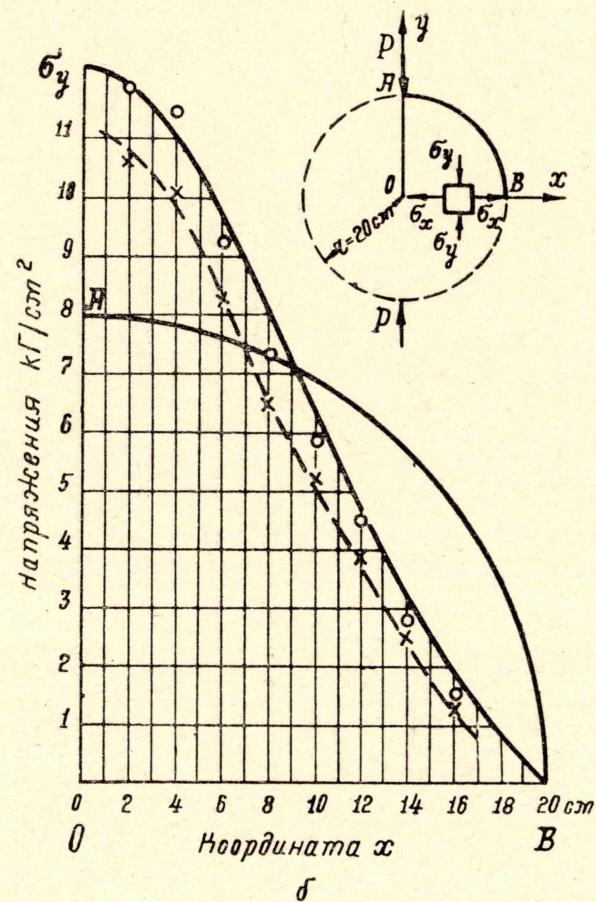
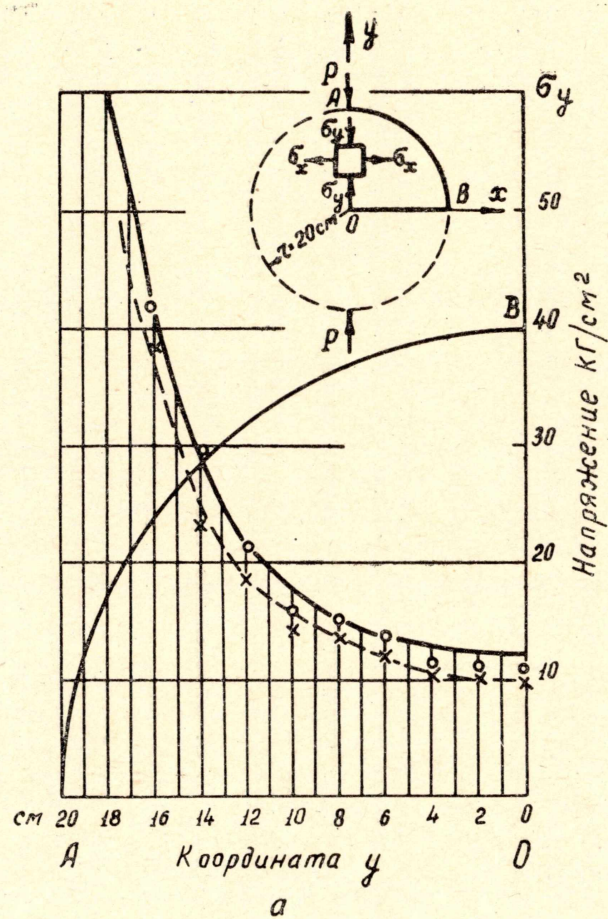


Рис. 3. Эпюры распределения σ_y для а) вертикального, б) горизонтального диаметра сжатого диска: \circ — напряжения, определенные по предлагаемой тарировке тензодатчиков; \times — напряжения, определенные в тех же условиях опыта по тем же показаниям датчиков, но подсчитанные обычным путем при предварительной тарировке одного датчика.

Существенную роль играют характер и точность приложения сжимающей силы. Отклонение действия силы от плоскости, проходящей через поперечное сечение диска с наклеенными датчиками, вносит значительные ошибки. Для избежания подобных ошибок в пробных опытах с дисками диаметром 10 см и толщиной 1 см были высверлены небольшие лунки для передачи сжимающих сил при помощи шариков. Однако это отрицательным образом сказалось на показаниях периферийных датчиков, расположенных в непосредственной близости от места нахождения лунок, послужило концентратором напряжений и привело к местному сколу материала диска при сравнительно небольшой нагрузке.

При проведении основной серии опытов с диском диаметром 40 см и толщиной 4,5 см пришлось отказаться от нанесения лунок, а устанавливать диск по показаниям контрольных датчиков, наклеенных симметрично по обеим сторонам диска, добиваясь совпадения их показаний.

Проведенное исследование показывает возможность определения фактических напряжений при плоском напряженном состоянии с различным соотношением главных напряжений по показаниям малобазных датчиков петлевого типа, которые, как известно, вносят значительное искажение величины измеряемой деформации. Но для этого необходимо в результате тарировки двух датчиков получить характеристики их чувствительности к продольной и поперечной деформациям (углы α и β на рис. 2) и вести расчет по формулам (1) и (2).

Используя этот вывод в новой серии опытов, когда датчики были наклеены с очень малым шагом, установили, что отклонение фактических значений растягивающих напряжений по вертикальному диаметру заканчивается на расстоянии примерно 0,1 диаметра от точки приложения сжимающей силы. Это расстояние практически не зависит от величины действующей силы.

Наибольшее увеличение фактических растягивающих напряжений оказалось на расстоянии примерно 0,03 диаметра диска от точки приложения сжимающей силы и превосходит теоретическое значение в 6—10 раз. В опытах действующая сила изменялась от 200 до 2000 кг, что не вызвало изменения величины и места наибольших растягивающих напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Верховский А. В., Романовская В. В. Определение предела прочности при растяжении методом сжатия цилиндрических образцов. Заводская лаборатория, № 11, 1951.
2. Седоков Л. М. Статические испытания хрупких материалов. Стандартизация, № 1, 1961.
3. Седоков Л. М., Богомолов Ю. С. Определение прочности хрупких пластмасс на разрыв путем сжатия цилиндрических образцов по радиусу. Пластические массы, № 11, 1962.
4. Пфлаумер О. Э. Определение прочности бетона при растяжении ЦБТИ. Москва, 1959.
5. Фрохт М. М. Фотоупругость. т. II, Госиздат технико-теоретической литературы, 1950.
6. A. U. Huggenberger. Über die Querdehnungsempfindlichkeit von Dehnungsmessstreifen und ihre Beseitigung. Grundlagen und Anwendungen des Dehnungsmessstreifens. Dr. K Fink, Verlag Stahleisen M. B. H. Düsseldorf, 1952.
7. Митиченко Г. А. Измерение напряжений на внутренних поверхностях сосудов под давлением. Измерение напряжений и усилий в деталях машин, под редакцией Пригоровского Н. И., Машгиз, 1955.