

О РОЛИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕССЫ РАЗРУШЕНИЯ

КАЗАКБАЕВА Г.О.
izvestiva@ktu.aknet.kg

Рассматривается роль остаточных напряжений в твердых телах, методы измерений и их влияние на процессы разрушения. На основе анализа сделан вывод о влиянии остаточных напряжений на характер разрушения твердых тел.

В 1887 году впервые в исследованиях крупного русского ученого Н.В. Калакуцкого [1] был поднят вопрос о роли остаточных напряжений в твердых телах. Однако многолетняя работа в этом направлении должного результата не принесла. Интерес к остаточным напряжениям возрос после первой мировой войны, когда на практике проявилось их влияние на работе многих изделий военного назначения. Большая заслуга в возрождении исследований по этой проблеме принадлежит научной школе Н.Н. Давиденкова [2].

Заинтересовавшись указанной выше проблемой впервые в конце двадцатых годов XX-столетия, Н.Н. Давиденков оценил то огромное значение, которое имеют в технике остаточные напряжения, и несовершенство методов их измерения существующих к тому времени. Поэтому особое внимание он уделял разработке строгих и надежных способов измерения остаточных напряжений и в течение многих лет занимался их совершенствованием. Ни одно из исследований проблемы остаточных напряжений в металлах того времени не обходилось без прямого или косвенного участия Н.Н. Давиденкова. Им было предложено принципиальное разделение остаточных напряжений на напряжения I, II и III рода (соответственно макроскопические, микроскопические и субмикроскопические) [3]. Эта классификация остаточных напряжений нашла широкое применение в металловедении и рентгенографии для четкого разграничения макро- и микропроцессов. Особенное внимание он уделял исследованию остаточных напряжений I рода в металлах, для оценки прочности изделий, изготовленных из них [4]. Придавая большое значение механическим способам измерения остаточных напряжений, вместе с тем он искал и другие пути решения этой задачи, менее трудоемкие и более прямые. Позднее Н.Н. Давиденковым и его учениками предложен метод сверлений, который позволял с помощью рентгенограмм определить действующие в точке материала главные напряжения [5].

В стекле остаточные напряжения обычно измеряются с помощью оптического и механического методов. При измерении оптическим методом значения остаточных напряжений в стекле получаются несколько завышенными, чем эти же напряжения, измеренные механическим методом. Это объясняется тем, что при измерении напряжений механическим методом в стекле удаляется верхний слой и при этом значительная часть остаточных напряжений снимается. Тем не менее, авторы статьи [6] предлагают механический метод измерения напряжений для определения распределения остаточных напряжений и построения их полных эпюр в закаленных стеклах. По их мнению, незначительное увеличение напряжений в центральной зоне изделия из стекла приведет к значительному увеличению остаточных напряжений на поверхности и тем самым заметно повысит его прочность.

На практике разрушение твердых тел под воздействием остаточных (внутренних) напряжений происходит чаще, чем разрушение под воздействием внешних сил. Поэтому при расчете на прочность твердого материала необходимо учитывать влияния остаточных напряжений на его деформацию и разрушение.

В работе [7] отмечается, что прочность и разрушение твердых тел зависят от условий деформирования, вида напряженного состояния, размеров образцов, продолжительности нагружения, температуры испытаний, наличия величины остаточных напряжений. Например, изменение прочностных характеристик стекла зависит от химического состава и наличия в стекле остаточных напряжений. К моменту полного разрушения в закаленных стеклянных образцах накапливается значительная упругая энергия, что приводит к взрывоподобному разрушению, указывая на высокую скорость окончательного разрушения. При этом наблюдается большое число осколков и высокая шероховатость поверхности излома. Значение напряжений в изделии из стекла (на примере окна самолета) представляет собой алгебраическую сумму. Это внутренние остаточные напряжения (σ_1),

напряжения, заложенные в результате технологических операций (σ_2), а также напряжения от монтажа (σ_3), надува кабины (σ_4), аэродинамического напора (σ_5), эксплуатационного температурного перепада (σ_6), воздействия окружающей среды (σ_7), не учтенных при конструировании деформаций стекла, т.е.

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6 + \sigma_7,$$

В статье [8] описываются случаи хрупкого разрушения стеклянных изделий, обладающих остаточными напряжениями 1 рода. В работе отмечается, что критическая величина напряжений при разрушении материала связывается с поверхностной энергией. Процесс трещинообразования сопоставляется с распределением напряжений и величиной упругой энергии, высвобождающейся при разрушении материала. В связи с этим особый интерес приобретает накопление и обработка данных по разрушению деталей, изготовленных из различных материалов и находящихся под воздействием остаточных напряжений разного рода.

Н.Н. Давиденков особо отмечал роль накопленной в системе потенциальной энергии в образовании хрупких трещин. В статье [9] авторы обратили внимание на использование запасов потенциальной энергии в процессе разрушения металлов при ударных изломах.

А в работе [10] идея об использовании запасов потенциальной энергии была развита применительно к распространению трещин в сварных листах под воздействием остаточных напряжений. При разрушении материала с остаточными напряжениями выделяющаяся энергия, в объеме тела, с ростом трещины, концентрируется в устье трещины и расходуется на поверхностную энергию.

Исследование картины разрушения образцов с известным начальным распределением напряжений, позволяет сопоставить траектории трещин с линиями главных напряжений. Это дает возможность проведения анализа напряжений и характера разрушения. Для упрочнения твердых тел преднамеренно создаются поверхностные сжимающие остаточные напряжения. Вместе с тем в работе [10] автором предлагается использовать остаточные напряжения для разупрочнения твердых тел и обеспечить требуемый характер их разрушения.

В статье [11] освещены результаты оптического исследования остаточных напряжений, вызывающих определенный характер разрушения. При сеткообразном разрушении (в отличие от кольцеобразных трещин) остаточные напряжения в образце снимаются практически полностью. Например, если распределить остаточные напряжения таким образом, чтобы упругая энергия, сопоставимая по величине с работой по образованию новой поверхности раздела, выделялась, лишь при раскалывании образца по определенному направлению, требуемый характер разрушения будет заведомо обеспечен. Автором в данной работе отмечается, что направленное разрушение с помощью остаточных напряжений может найти в технике самое широкое применение.

В работе [12] рассматривается актуальная задача о влиянии остаточных напряжений на процессы хрупкого разрушения твердых тел. В кажущихся прочными твердых телах быстрое развитие трещин может происходить при напряжениях значительно меньших, чем их временное сопротивление. На переход материала из пластического состояния в хрупкое большое влияние оказывает характер напряженного состояния в деформированном теле. Чем неоднороднее поле напряжений, тем легче совершается переход материала в хрупкое состояние. Одним из ярких проявлений неоднородности напряженного состояния является концентрация остаточных напряжений, которая препятствует развитию пластических деформаций по всему объему и способствует локализации пластических деформаций в небольшой области. Поэтому при наличии высоких остаточных напряжений материал имеет склонность находиться в хрупком состоянии. Для примера в данной книге автор описывает следующий эксперимент. Образцы разной формы изготавливались из одного и того же материала. Естественно, в них должны иметь место разные по уровню остаточные напряжения. Наличие остаточных напряжений в образцах, вне зависимости от формы и размеров, при их испытании на сжатие (растяжение), приводит к переходу материала из пластического состояния в хрупкое. Плоское или объемное поле остаточных напряжений первого рода может иметь настолько заметный вес в поле суммарных напряжений, что обусловленная им неравномерность распределения напряжений в состоянии вызвать переход из пластического состояния материала в хрупкое.

Такой эксперимент был проведен авторами работ [13-14] на оптически активных образцах призматической и цилиндрической форм, изготовленных из эпоксидной смолы марки ЭД-6. В этих образцах были созданы разные уровни остаточных напряжений. Испытанию на одноосное сжатие подвергались образцы без остаточных напряжений и с остаточными напряжениями разного уровня. При этом полученные результаты подтверждают вышеописанный пример. Действительно, те образцы, в которых имели место более высокие уровни остаточных напряжений, разрушались

хрупко, со звуковым эффектом. Образцы, изготовленные из того же материала, но без остаточных напряжений при одинаковых условиях испытаний на одноосное сжатие зачастую деформировались, пластически не разрушаясь.

При изготовлении изделий или при создании ответственных конструкций необходимо учитывать роль остаточных напряжений. К сожалению, в инженерных расчетах на прочность при изготовлении различных конструкций, изделий не учитывают остаточные напряжения, что часто приводит к хрупкому разрушению.

В статье [15] авторы рассматривают причины явления самоподдерживающегося разрушения твердого тела, которое хорошо известно. Авторами в данной работе приводится следующий пример. В куске из твердого материала, который находится в поле всесторонних сжимающих напряжений, развития начальных сдвиговых микротрещин не происходит. А при освобождении от внешних сжимающих нагрузок моментально от поверхности в глубь куска начнет распространяться волна разгрузки. Если запасенная телом потенциальная энергия упругого сжатия достаточно велика, то сдвиговые микротрещины, находящиеся во фронте волны разгрузки, становятся неустойчивыми. Их динамическое развитие приводит к разрушению тела. В случае очень большого числа таких неустойчивых микротрещин можно говорить о волне разрушения, подразумевая под этим границу, разделяющую разрушенный материал от неразрушенного. Авторы подчеркивают, что скорость распространения волны разрушения не зависит от скорости распространения отдельных трещин и в частности, не определяется предельной скоростью распространения изолированной трещины, равной скорости волн Рэлея. Самоподдерживающийся механизм разрушения, состоящий в переходе упругой потенциальной энергии твердого тела в поверхностную и кинетическую энергию отдельных частиц разрушенного тела, напоминает самоподдерживающийся механизм распространения детонационной волны, в которой ударная волна подпитывается за счет запаса химической энергии в теле. Самоподдерживающееся разрушение твердого тела сопровождается сильным звуком и разбрасыванием частиц разрушенного вещества, что внешне напоминает слабый взрыв. Основным фактором, определяющим способность твердого тела к самоподдерживающемуся разрушению, является запас упругой потенциальной энергии в неразрушенном теле. Необходимый запас упругой энергии в теле может быть создан внутренними (остаточными) сжимающими напряжениями технологически.

Таким образом, обобщая вышеизложенное, можно заключить, что остаточные напряжения оказывают существенное влияние на процессы деформирования и разрушения твердых тел.

Литература

1. Давиденков. Н.Н. Об измерении остаточных напряжений. // Зав. лаб., VI №8, 1937. - С.987-990.
2. Давиденков Н.Н. Некоторые проблемы прочности твердого тела. // Сб. статей посвященный 80-летию академика АН УССР Н.Н.Давиденкова. Изд-во Москва- Ленинград, 1959. – С.386.
3. Давиденков Н.Н. Измерение остаточных напряжений в трубах. // ЖТФ, I, №1, 1931. - С. 5-17.
4. Давиденков Н.Н., Витман Ф.Ф. Остаточные напряжения в латунных гильзах. // Вестник металлопрома, II, -№7, 1931. -С.71-76.
5. Давиденков Н.Н. Об остаточных напряжен. // Зав. лаб., IV №6, 1935. -С.688-693.
6. Степанов В.А, Ходаков Л.Г. Измерение остаточных напряжений в закаленных стеклах механическим методом. // В сб. статей, посвященный 80-летию академика АН УССР Н.Н. Давиденкова Некоторые проблемы прочности твердого тела, Издательство АН СССР Москва- Ленинград,1959. -С.348-356.
7. Инденбом В.Л. Инф. - техн.сб. НИИ электровакуумного стекла. №8, 1958.
8. Инденбом В.Л. Некоторые наблюдения за разрушением тел под воздействием внутренних напряжений. // В сб. статей посвященный 80-летию академика АН УССР Н.Н. Давиденкова. Некоторые проблемы прочности твердого тела. Издательство АН СССР. Москва-Ленинград, 1959. -С.357-366.
9. Мороз Л., Шураков С. Проблема прочности цементированной стали. Ленинград, 1947.
10. Шимелевич И. Сб. Металловедение. // Судпромгиз,1957. -С.70.
11. Солнцев С.С., Морозов Е.М. Разрушение стекла. – М.: Машиностроение, 1978. – 145 с.
12. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. //Сопроотивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики, Том I, М.: Изд-во Наука, 1975. - С.259-261.

13. Айтматов И.Т., Тажибаев К.Т., Казакбаева Г.О. Исследование остаточных напряжений в горных породах на основе поляризационно-оптического метода моделирования. // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. Том 6. №7, Бишкек, 2006. - С.13-18.
14. Тажибаев К.Т., Казакбаева Г.О., Султаналиева Р.М., Акматалиева М.С. Влияние остаточных напряжений на акустические характеристики и прочность твердых деформируемых сред. // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Материалы международной научно-технической конференции «Наука, образование, инновации: приоритетные направления развития. Бишкек, 2009. - С.358-362.
15. Галин Л.А., Черепанов Г.П. О самоподдерживающемся разрушении напряженного хрупкого тела. // Доклады АН СССР, Том 163, №3, 1966. - С.543-546.

