Молдаванов С.Ю.**Прогнозирование длительной прочности полых сфер при действии внешнего гидростатического давления***Кубанский государственный технологический университет
(Россия, Краснодар)**doi:10.18411/spc-12-02-2018-18**idsp: 000001:spc-12-02-2018-18*

Рассмотрим основные положения статистической модели накопления повреждений и разрушения твердых тел, используемой в данной работе [1].

1. Разрушение твердых тел при действии внешних сил представляет собой термодинамически необратимый вероятностный процесс накопления повреждений развивающийся во времени на различных уровнях структурной организации материала.

2. Образование, накопление и развитие повреждений различных типов на всех уровнях разрушения происходит в результате накопления необратимых разрывов связей. В процессе разрыва связи атомы преодолевают некоторый энергетический барьер. Величина энергетического барьера зависит от средней удельной внутренней энергии, которая полностью определяет уравнения состояния и физико-механические свойства макрочастицы твердого тела.

3. Ввиду того, что микроструктура реальных материалов содержит дефекты и неоднородности, удельная внутренняя энергия неоднородно распределяется по связям в пределах макрочастицы. Начало и развитие процесса разрушения во времени в высокой степени локализовано и определяется функциями распределения минимальных времен разрушения (разрыва связей, разрушения макрочастицы, разрушение тела) на каждом уровне, которые могут быть вычислены на основании концепции наислабейшего звена с переменным числом звеньев.

Пусть случайная величина t представляет время необратимого разрыва связей (атомных, молекулярных) в данной точке тела X . Пусть $P(t, X)$ представляет функцию распределения времен необратимого разрыва связей, а $p(t, X)$ – представляет плотность распределения времен необратимого разрыва связей, которые удовлетворяют естественным условиям:

$$\int_{t_0}^{t^*} p(t, X) dt = 1, \quad P(t, X) = \int_{t_0}^t p(t, X) dt, \quad (1)$$

где X – вектор лагранжевых координат точек тела, t_0 – наименьшее и t^* – наибольшее время разрыва связи.

Вычислим плотность распределения времен необратимого разрыва связей $p(t, X)$ [1]. В процессе разрыва связей атомы или молекулы, совершая колебания около своего равновесного положения, преодолевают некоторый энергетический барьер. Если величина этого барьера равна $U_m - \gamma \hat{U}$, то колеблющийся атом в состоянии преодолеть его лишь за какую-то часть периода колебаний, пропорциональную бoльцмановскому распределению вероятностей тепловых флуктуаций в зависимости от энергетического состояния атома [2]. Пусть частота колебаний атома равна $1/\tau_0$. Тогда при обычных тепловых колебаниях относительно положения равновесия атом $1/\tau_0$ раз в секунду «ударяется» о потенциальный барьер. Большую часть времени энергия атома мала для преодоления энергетического барьера, но иногда (в соответствии с распределением Больцмана) в результате флуктуаций энергия атома может превысить высоту энергетического барьера и происходит разрыв

связи. Тогда с учетом действия внешних сил вероятность разрыва связи в единицу времени будет равна [1]:

$$\omega = \tau_0^{-1} \exp[-(U_* - \gamma U)/kT], \quad (2)$$

где $\hat{U}$ – удельная внутренняя энергия в точке тела $\mathbf{X}$.

Выражение для удельной внутренней энергии $\hat{U}$ можно записать в зависимости от тензора напряжений $\tilde{S}(\tau, \mathbf{X})$:

$$U = U[\tilde{S}(\tau, \mathbf{X}), T(\tau, \mathbf{X})], \quad t_0 \leq \tau \leq t. \quad (3)$$

где τ_0 – период тепловых колебаний атомов (молекул), $U_* = (U_m - \gamma \langle U_0 \rangle)$ – энергетический барьер в отсутствие действия внешних сил, $\langle U_0 \rangle$ – средняя удельная внутренняя энергия, приходящаяся на одну связь в отсутствие действия внешних сил, U_m – энергия сублимации связи, k – постоянная Больцмана, $T(\tau, \mathbf{X})$ – абсолютная температура, $\gamma = k_0 \gamma_c$, γ_c – часть объема тела, приходящаяся на одну связь, $k_0 \geq 1$ – коэффициент неоднородности распределения внутренней энергии между связями в макрочастице тела.

В макрочастице твердого тела разрывы и восстановления связей происходят одновременно. Для безопасного уровня внутренней энергии $\hat{U} = \langle U_0 \rangle + U_0$, вероятность (2) разрыва связей и их восстановления в единицу времени одинаковы и равны:

$$\omega_0 = \tau_0^{-1} \exp[-(U_* - \gamma U_0)/kT] \quad (4)$$

$$U_0 = U_0[\tilde{S}(\tau, \mathbf{X}), T(\tau, \mathbf{X})], \quad 0 \leq \tau \leq t_0. \quad (5)$$

В этом случае общее число связей в макрочастице твердого тела остается неизменным и процесс накопления повреждений и разрушения не наблюдается. При условии, когда $U > U_0$, вероятность актов разрыва связей в единицу времени ω , определяемая по выражению (2), будет больше, чем вероятность их восстановления ω_0 (4). Тогда в результате необратимого разрыва связей происходит образование и накопление субмикроразрушений макрочастицы тела. Следовательно, вероятность необратимого процесса разрыва связей в единицу времени равна:

$$p(t, \mathbf{X}) = \omega - \omega_0 = B \left\{ \exp[\gamma(U - U_0)/kT] - 1 \right\}, \quad (6)$$

где $B = \tau_0^{-1} \exp[-(U_* - \gamma U_0)/kT]$.

Полученное выражение (6) содержит многочисленные частные случаи. В случае деформации термоупругих тел при условии $T = T_0 = \text{const}$ внутренняя энергия макрочастицы твердого тела является функцией тензора напряжений, и, следовательно, $p(t, \mathbf{X}) = p(\mathbf{X})$. Используя выражения (1), (4), (5) и (6), получаем:

$$P(\mathbf{X}) = (t - t_0) / [t^*(\mathbf{X}) - t_0], \quad (7)$$

$$p(\mathbf{X}) = [t^*(\mathbf{X}) - t_0]^{-1}, \quad (8)$$

$$t^*(\mathbf{X}) - t_0 = B^{-1} \left\{ \exp[\gamma(U - U_0)/kT_0] - 1 \right\}^{-1}, \quad (9)$$

$$B = \tau_0^{-1} \exp[-(U_* - \gamma U_0)/kT_0]. \quad (10)$$

где $U_0 = U_0[\tilde{S}_0(\mathbf{X}), T_0]$, $\tilde{S}_0(\mathbf{X})$ – тензор безопасных напряжений.

Удельная внутренняя энергия твердого [3] тела определяется по формуле

$$U = \frac{1+\nu}{2E} \sigma_{ij} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{2E} \sigma_{kk}^2 + T \alpha \sigma_{kk}, \quad (11)$$

где T – температура; E – модуль упругости материала; α – коэффициент линейного теплового расширения материала; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ν – коэффициент Пуассона.

Воспользуемся допущением о естественном состоянии твердого тела, в соответствие с которым при отсутствии внешних воздействий напряжения и деформации в твердом теле не возникают и, следовательно,

$$\exp \frac{\gamma U_0}{kT(t)} = 1.$$

Тогда наибольшее время разрушения макрочастицы твердого тела t^* будет стремиться к бесконечности при выполнении следующего условия

$$\frac{1+\nu}{2E} \sigma_{ij} \sigma_{ij} - \frac{\nu}{2E} \sigma_{kk}^2 + T \alpha \sigma_{kk} = 0. \quad (12)$$

Условие (12) будет выполняться, если первый инвариант напряженного состояния $\sigma_{kk} < 0$, что соответствует сжатию материала. Из полученного условия (12) в работах [4] и [5] было получено выражение для вычисления безопасных напряжений в термоупругих телах для случая двухосного сжатия ($\sigma_{11} = \sigma_{22} = \text{const} = -\sigma$):

$$\sigma_0^{(2)} = \frac{2E\alpha T}{1-\nu}. \quad (13)$$

Рассмотрим сферическую оболочку (рис. 1), нагруженную внешним гидростатическим давлением. Воспользуемся безмоментной теорией оболочек В.З. Власова [6]. Действие внешнего гидростатического давления p на замкнутую сферическую приводит к возникновению в ее нормальных и меридиональных сечениях сжимающих сил N_1 и N_2 . Эти усилия относятся к единице длины дуги контура соответствующего сечения и постоянны для любой точки сферы:

$$N_1 = N_2 = \frac{pR}{2}. \quad (14)$$

Рисунок 1. Сферическая оболочка

Следовательно, материал сферической оболочки работает в условиях двухосного сжатия. Приравнявая выражения (14) и (16), получаем формулу для вычисления безопасной величины внешнего гидростатического давления:

$$p_0 = \frac{4E\alpha T\delta}{(1-\nu)R}, \quad (17)$$

где δ – толщина оболочки, R – радиус кривизны срединной поверхности.

В работе [7] были приведены данные экспериментальных исследований прочности замкнутых сферических оболочек, изготовленных из стекла марки МКР-1. Оболочки собирались из двух полусферических блоков и стыковались с помощью эпоксидного клея-компаунда. Стекло марки МКР-1 имеет следующие физико-механические характеристики: коэффициент Пуассона $\nu = 0,22$; модуль упругости $E = 76$ ГПа; коэффициент линейного теплового расширения $\alpha = 4 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$. Радиус срединной поверхности оболочки $R = 94,5$ мм, толщина стенки $h = 11$ мм.

Температура $T = 293^\circ$ К. Используя выражение (17), вычислим величину безопасного гидростатического давления для сферических оболочек из стекла марки МКР-1

$$p_0 = \frac{4E\alpha T\delta}{(1-\nu)R} = \frac{4 \cdot 76 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 293 \cdot 11 \cdot 10^{-3}}{(1-0,22) \cdot 94,5 \cdot 10^{-3}} = 53,17 \text{ МПа.}$$

Составные стеклянные оболочки [7] подвергались следующим видам испытаний: кратковременному однократному гидростатическому давлению вплоть до разрушения; повторно-статическому нагружению и длительному нагружению при действии статической нагрузки.

При кратковременном нагружении разрушились 17 оболочек, которые отличались качеством изготовления, тщательностью подбора стеклоэлементов и точностью сборки. Результаты кратковременных испытаний свидетельствуют о значительном влиянии конструктивных и технологических факторов на прочность составных оболочек. Оболочки, разрушившиеся при внешнем давлении 59–90 МПа, имели максимальные несовершенства геометрии в виде радиальных смещений кромок в стыке и увеличенную толщину клеевого шва. Торцы стеклоэлементов остальных оболочек предварительно обрабатывались алмазным инструментом, что позволило значительно уменьшить толщину клеевого шва и существенно повысить их несущую способность (рис. 2).

Оболочки, предназначенные для повторно-статических испытаний [7], были разделены на две группы. Первая группа подвергалась повторно-статическим испытаниям при уровне максимального давления в цикле 59 МПа с длительностью цикла 17 минут. После 100 циклов нагружения испытываемые оболочки никаких видимых повреждений не получили. Затем эти оболочки подвергали повторному циклическому нагружению при давлении в цикле 98 МПа. Дополнительные испытания показали ограниченную работоспособность стеклянных оболочек в таких условиях нагружения (разрушение наблюдалось в 1–10 циклах).

Рисунок 2. Экспериментальные данные по исследованию прочности стеклянных сфер, нагруженных гидростатическим давлением

- оболочки, разрушившиеся при однократном нагружении, с дефектами геометрии и увеличенной толщиной клеевого шва;
- оболочки, разрушившиеся при однократном нагружении, с улучшенной геометрией и уменьшенной толщиной клеевого шва;
- оболочки, не разрушившиеся в результате повторно-статических испытаний;
- оболочки, не разрушившиеся при длительном действии статической нагрузки

Вторая группа оболочек подвергалась последовательному 1850-кратному повторно-статическому нагружению при максимальном давлении 78 МПа с последующим 100-кратным нагружением до 59 МПа. Эти оболочки получили незначительные повреждения в виде мелких сколов стекла и остались пригодными для дальнейших испытаний (рис. 2).

На следующем этапе эксперимента [7] определялось сопротивление разрушению составных оболочек при длительном действии статической нагрузки. Выдержка стеклянных оболочек под постоянным внешним давлением составляла 50 или 100 часов. Непрерывное однократное нагружение оболочки в течении 50 часов внешним гидростатическим давлением 98 МПа не привело к образованию каких-либо видимых локальных повреждений стеклоэлементов или изделия в целом (рис. 2). Нагружение составных стеклянных оболочек в течении 300 часов ступенчатым повышением внешнего давления 10, 20 и 29 МПа (по 100 часов каждым) также не вызвало никаких повреждений.

Результаты экспериментальных исследований [7] хорошо согласуются с полученной формулой для определения безопасного уровня внешнего гидростатического давления при нагружении сфер.

1. Dunaev I.M. Statistical Theory of Fracture of Structural Materials at Damage Accumulation. Proc. of Joint FEFG/ICF Int. Conf. on Fracture of Eng. Mat. & Structures. □ Elsevier Applied Science, 1991, pp. 832□837.
2. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Статистическая физика. – М.: Наука, 1964, 567 с.
3. Дунаев И.М. Разрушение эластомеров. В кн. Механика эластомеров. Межвузовский сб. □ Краснодар, Краснодар. политехн. ин-т, 1981, С. 24□33.

4. Молдаванов С.Ю. Прогнозирование длительной прочности термоупругих тел при сжатии. Научные труды SWorld. 2013. Т. 3. № 2. С. 21-26.
5. Молдаванов С.Ю., Дунаев В.И. Вычисление предела длительной прочности неорганических стекол при сжатии. Политехнический вестник. 2013. № 1 □ 2. С. 13 □ 18.
6. Власов В.З. Избранные труды. Общая теория оболочек. Т. 1. □ М. : Издво АН СССР, 1962 . □ 528 стр.
7. Квитка А.Л., Дьячков И.И. Напряженное состояние и прочность оболочек из хрупких неметаллических материалов. □ Киев: Наукова думка, 1983, 284 с.

Мунин А.А., Бржозовский Б.М.

**Исследование инварных покрытий получаемых наплавкой
и их характеристики и свойства**

*СГТУ им.Гагарина Ю.А.
(Россия, Саратов)*

doi:10.18411/spc-12-02-2018-19

idsp: 000001:spc-12-02-2018-19

Аннотация

Статья посвящена инварных покрытий их характеристикам и свойствам, нанесение их а поверхность с помощью наплавки. Предлагаемая технология нанесения наплавочных покрытий исключает применение дополнительных операций. По результатам испытаний сделаны выводы об эффективности нанесения данного сплава.

Ключевые слова: Инварные покрытия, инвары, наплавка покрытий, свойства, испытания, эффективность.

Актуальность темы. В условиях истощения сырьевых ресурсов, экологических и социально-экономических затруднений особую значимость обретают ресурсосберегающие технологии, которые все чаще сопровождаются освоением методов наплавки.

В настоящее время проблема срока службы деталей машин и агрегатов, их долговечности и надежности приобрела весьма большое значение. Срок службы быстроизнашивающихся деталей определяет рентабельность многих дорогостоящих машин. Поставленная задача решается тем, что в способе восстановления наплавкой поверхностей деталей, включающем наплавку плавящимся электродом на поверхность восстанавливаемой детали, перемещаемой относительно электрода, с образованием наплавочной ванны, подачу в наплавочную ванну присадочной проволоки, согласно предлагаемому решению присадочную проволоку, выполненную из интерметаллидов в частности никеля и нихрома, подают под острым углом к направлению подачи плавящегося электрода перед или после него по направлению относительного перемещения детали и на расстоянии от него, обеспечивающем сохранение интерметаллидных элементов в наплавленном металле, при этом присадочную проволоку изолируют от тока.

В наплавочную ванну вводят одну или две дополнительные присадочные проволоки, которые располагают с противоположной стороны от первой присадочной проволоки относительно плавящегося электрода.

В наплавочную ванну вводят три дополнительные присадочные проволоки, одну из которых располагают со стороны первой, а две другие - с противоположной стороны относительно плавящегося электрода. При этом две присадочные проволоки, расположенные с одной стороны относительно плавящегося электрода, параллельны друг другу и расположены симметрично плоскости, параллельной вектору мгновенной скорости детали и перпендикулярной поверхности детали в точке контакта плавящегося электрода с поверхностью детали.

Наплавку осуществляют под слоем флюса.