

УДК 539.4

О РАЗРУШЕНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ОБРАСТАНИЯ МОРСКИХ ПОДВОДНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© 2022 г. Н. М. Осипенко^{а,*}

^аИнститут проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

*e-mail: osipnt@mail.ru

Поступила в редакцию 13.08.2021 г.

После доработки 31.08.2021 г.

Принята к публикации 05.09.2021 г.

Разработка методов очистки морских судов и стационарных подводных конструкций таких, как нефтяные платформы от ракообразных обрастателей требует изучения их механических свойств, данных о прочности раковин – домиков обрастателей и их прикрепления к субстрату. Представлены методики и результаты механических испытаний на трещиностойкость фрагментов домиков-раковин *Chirona evermanni* из Охотского моря и, прикрепленных к каменному субстрату, домиков *Balanus eburneus* из Баренцева моря. Определены условия хрупкого разрушения при развитии трещины в раковине и при отделении раковины от субстрата.

Ключевые слова: раковина, клеевой слой, трещина, разрушение

DOI: 10.31857/S0572329922030102

1. Введение. Ракообразные обрастатели являются проблемой не только при эксплуатации морских судов, но и для подводных исполнительных элементов систем управления стационарных конструкций таких, как нефтяные платформы, в том числе, расположенных на большой глубине, что создает дополнительные сложности при их очистке. Для оптимизации качества очистки необходимы данные о прочности домиков обрастателей и их прикрепления к субстрату.

Методы борьбы с обрастанием подводных сооружений и судов включают ряд химических и термических воздействий, а также использование различного рода покрытий [1–3]. Механическая очистка, в том числе с применением гидродинамических и других воздействий также не потеряла актуальности. Основу прочности элементов обрастания составляет прочность раковин моллюсков и их связи с основанием (конструкцией) и друг с другом.

В работах по исследованию механики прочности элементов обрастания и соединения их с основанием в связи со сложностью структуры объектов, малыми размерами очагов разрушения, влиянием локальной формы и состава, основное внимание уделяется таким интегральным характеристикам, как прочность при растяжении, твердость, модуль упругости. Акцентируется также влияние локальных факторов на эффективную прочность и механизм разрушения [4]. При этом отмечается в основном упругая реакция элементов системы на механические воздействия [5]. Отдельным вопросом является структура и прочность клеевого слоя [6].

Вместе с тем, многие вопросы механики разрушения элементов обрастания, важные для практического применения при очистке подводных сооружений, в силу указанных причин и невозможности использования стандартных методов определения

механических характеристик, остаются мало изученными. Это создает необходимость разработки специальных методик испытаний, позволяющих оценивать уровень таких характеристик в некотором приближении, в частности используя методы воздействия, схематически близкие к практическим. К ним можно отнести определение склонности рассматриваемых объектов к распространению трещин, а также анализ других механизмов и сценариев деформирования и разрушения элементов обрастания и защищаемых конструкций при механических и других воздействиях.

Проведено определение трещиностойкости (критического коэффициента интенсивности напряжений K_{IC}) раковин усоногих моллюсков и клеевого слоя между раковиной и основанием. Представлены методики и результаты механических испытаний фрагментов раковин (домиков) морских желудей *Chirona evermanni* из Охотского моря и, прикрепленных к каменному субстрату, домиков *Balanus eburneus* из того же подотряда в Баренцевом море. Рассмотрено развитие трещины в раковине и при отделении раковины от субстрата.

2. Трещиностойкость раковин обрастания. Способ разрушения плоских образцов клином, предложенный в [7], был использован для создания методики определения трещиностойкости K_{IC} хрупких материалов. Создаваемые внешней нагрузкой (клином) силы сконцентрированы в малой области приложения. Поэтому в отношении условий разрушения можно для оценок использовать ряд упрощений. В частности, локальные внешние нагрузки можно свести к сосредоточенным силам, приложенным к берегам растущей трещины. В этом случае на начальном этапе развития разрыва, когда размер трещины много меньше характерного поперечного размера пластины образца, условия ее предельного равновесия близки к таковым для расклиняемой сосредоточенными силами трещины, выходящей на границу полуплоскости. К моменту приближения трещины к свободной границе вступает другая асимптотика, когда становится важным только расстояние до этой границы. В промежуточном состоянии ситуация напоминает условия предельного равновесия компактного образца, разрываемого сосредоточенными силами [8], для которого имеет значение соотношение продольного и поперечного размера фрагмента. Одним из важных свойств такого сценария разрушения является немонотонность коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в вершине растущего разрыва по мере его продвижения от области инициирования к внешней границе. В соответствии с этим трещина на начальном этапе развивается устойчиво, то есть для увеличения ее размера нужно увеличивать нагрузку. При достижении размера, определяемого соотношением габаритных размеров тела, этот режим сменяется неустойчивым, в результате чего при сохранении силового воздействия происходит разрыв. Максимальное усилие раскалывания, таким образом, достигается при минимальном значении коэффициента интенсивности напряжений и фиксированном отношении длины трещины и расстояния до внешней границы тела. В принятых ниже пропорциях образцов и начального размера трещины в условиях эксперимента фиксировалось хрупкое неустойчивое развитие трещины магистрального разрыва при достижении критического коэффициента интенсивности напряжений.

Разрушение производится внедрением стального клина углом раствора $2\alpha = 30^\circ$ в надрез в торце образца с последующим инициированием и распространением в нем трещины. Процесс внедрения клина в образец можно разбить на две стадии [8], первая из которых начинается с момента начала взаимодействия наклонных граней клина с надрезом в образце и заканчивается формированием магистральной трещины. Схема сил при внедрении клина в надрез приведена на рис. 1.

На этом этапе происходит частичное смятие материала образца в зоне трения на контактах клина и образца, а также локальное разрушение и образование зародышевых трещин в материале образца в вершине надреза. Вершина исходного надреза в плоскости надреза выполнялась в форме острого угла, обращенного вершиной к устью надреза. На рис. 2 показан фрагмент поверхности разрушения в области развил-

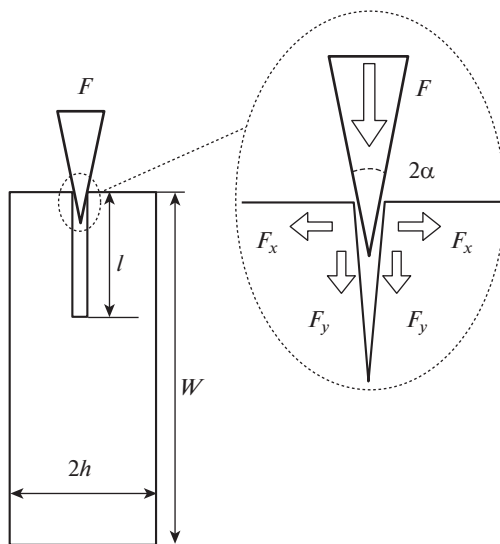


Рис. 1. Схема сил при внедрении клина в надрез образца.

ки (образец 3), 2, а – схема образца с трещиной, 2, б – схема клинообразной развилки (затемнена поверхность исходного надреза). Инициирование магистрального разрыва началось с развития малой трещины в вершине этого угла. Выход трещины на полный размер (толщину) образца обозначает переход ее в магистральную фазу, что открывает вторую стадию разрушения образца – распространение магистральной трещины. Оно происходит в динамическом режиме. Максимальное усилие при внедрении клина фиксируется в момент страгивания магистральной трещины.

На второй стадии при росте магистральной трещины, сопровождающемся движением клина вдоль контактной зоны (пятен контакта) поверхностей клина с образцом у основания надреза происходит упругое смещение точек контакта и проскальзывание клина по ним с трением. Наличие трения, в выбранной схеме разрушения, является фактором, который может влиять на формирование напряженно-деформированного состояния образца при инициировании магистральной трещины. Для проведения расчетов нужно знать коэффициент трения испытываемого материала о стальной клин, которым производится нагружение. В рассматриваемой схеме взаимодействия гладкого стального клина с раковинной коэффициент трения μ находится на уровне $\mu \leq 0.1$

Экспериментальная оценка коэффициента трения покоя на имеющихся фрагментах раковин в контакте со стальным клином показывает уровень $\mu = 0.06-0.08$. Для сравнения приведем значения коэффициентов трения по стали различных материалов: оргстекло (ПММА – $\mu = 0.18-0.3$, мрамор $\mu = 0.12-0.14$ [9]). В предположении постоянства коэффициента трения из связи нормальной и касательной к граням клина получим связь сил взаимодействия с нагрузкой – силой, действующей на компонент сил взаимодействия и условия равновесия клина при его поступательном движении F :

$$F_x = \frac{F \cos \gamma - \mu \sin \gamma}{2 \sin \gamma + \mu \cos \gamma} \quad (2.1)$$

При $\gamma = 15^\circ$, $\mu \approx 0.06-0.08$, $F_x = \frac{F \left(\frac{0.97 - \mu 0.26}{0.26 + \mu 0.97} \right)}{2} \approx kF$; $k = 1.4 - 1.5$, $F_y = F/2$

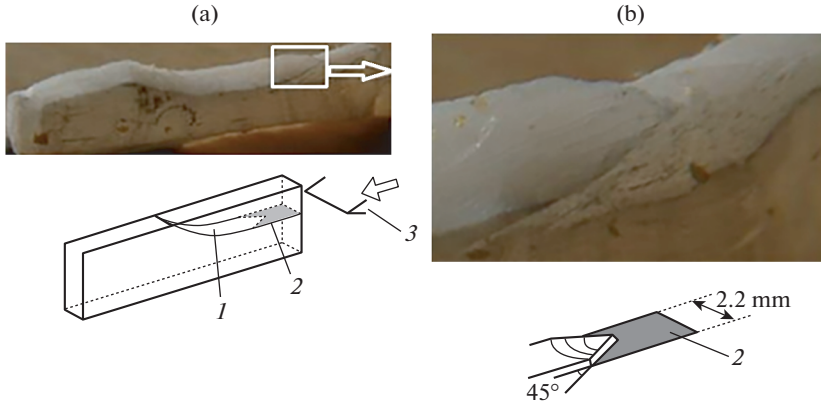


Рис. 2. Фрагмент поверхности разрушения в области развилки (образец 3). а – схема образца с трещиной (1 – трещина, 2 – надрез, 3 – клин), б – схема клинообразной развилки (затемнена поверхность исходного надреза).

Здесь 2γ – угол при вершине клина, μ – коэффициент трения, (F_x, F_y) – компоненты сил взаимодействия клина с образцом в координатах (x, y) , где ось (y) совпадает с биссектрисой угла клина и направлением его внедрения под действием силы (рис. 1). Далее для оценки сверху используется значение $k = 1.5$, соответствующее уровню $\mu \approx 0.06$.

Для экспериментального определения эффективного значения КИН на упомянутом плоском варианте прямоугольного образца с боковым надрезом можно использовать аппроксимации численных решений соответствующих задач механики разрушения [10]. Отметим два варианта схемы инициирования разрушения, которые могут быть полезны в рассматриваемой задаче. Схема сил в прямоугольном образце с надрезом ℓ показана на рис. 1 для варианта с ограниченными размерами модельной пластины в ситуации, когда поперечный размер пластины $2h$ превышает продольный w . Это дает оценку КИН снизу

$$K_1 \approx \frac{F_x}{\sqrt{w}} \frac{(2 + \ell/w)}{(1 - \ell/w)^{3/2}} \times \left(0.807 + 8.858 \frac{\ell}{w} - 30.23 \left(\frac{\ell}{w}\right)^2 + 41.088 \left(\frac{\ell}{w}\right)^3 - 24.15 \left(\frac{\ell}{w}\right)^4 + 4.95 \left(\frac{\ell}{w}\right)^5 \right) \quad (2.2)$$

Заметим, что (2.2) в диапазоне $\ell/w \geq 0.16$ с точностью до 5% можно заменить простым соотношением

$$K_1 \approx 3.65 \frac{F_x}{\sqrt{w}} \frac{1}{(1 - \ell/w)^{3/2}} \quad (2.3)$$

Для дальнейших оценок в реальной ситуации, задаваемой имеющимися заготовками образцов, когда поперечный размер образца, на котором присутствует начальный надрез, меньше, чем его продольный размер, используем вариант, полученный в балочном приближении из численного решения задачи и приведенный в [10].

$$K_1 \approx \frac{F_x}{i\sqrt{h}} f_1(\alpha) = \frac{1.5F}{i\sqrt{h}} f_1(\alpha), \quad \alpha = \ell/W \quad (2.4)$$

Значения параметра $f_1(\alpha)$ даны в [10] (в таблице 1.12).

Возвращаясь к влиянию разделения сил на клине, отметим также, что поскольку воздействие со стороны клина происходит локально в области устья надреза, продоль-

ные силы F_y , также создают изгибающий момент в плоскости образца [8]. Этот момент при встречном изгибе балок в устье надреза вызывает стремление к их смыканию у клина и дополнительное растяжение, повышающее КИН в концевой части надреза [11, 12]. Энергия изгиба соседних балок по этому сценарию

$$U_{\Sigma} \approx \frac{3F_y^2 \ell}{2Et^3} = \frac{3F^2 \ell}{8Et^3} \quad (2.5)$$

Удельная энергия развития трещины

$$G \approx \frac{3F_y^2}{2Et^2h} = \frac{3F^2}{8Et^2h} \quad (2.6)$$

Следовательно, вклад этого дополнительного изгиба в коэффициент интенсивности напряжений можно оценить как

$$\Delta K_I \approx \frac{\sqrt{3}F_y}{t\sqrt{2h}} = \frac{\sqrt{3}F}{2t\sqrt{2h}} \quad (2.7)$$

Оценки показывают, что для клина с углом раскрытия $2\gamma \leq 30^\circ$ преобладающее влияние имеют поперечные силы F_x [8, 10]

В рассматриваемом случае (при $\mu \approx 0.06$) оценку соотношения между этими силами можно сделать из (2.4) и (2.7).

$$\Delta K_I(F_y)/K_I(F_x) \approx 0.5/f_1(\alpha) \quad (2.8)$$

Как будет показано ниже, в рассматриваемых вариантах нагружения клином параметр $f_1(\alpha)$ принимает значения в диапазоне 9–15. Поэтому можно считать, что в проводимых оценках вклад продольных сил F_y в уровень измеряемого КИН не превышает 5%.

Суммируя сказанное, получим формулу для оценки K_{IC} , при суммарном действии поперечных и продольных нагрузок, возникающих при внедрении клина и принятых параметров трения

$$K_I \approx \frac{1.35F}{t\sqrt{h}} f_1(\alpha)(1 + 0.5/f_1(\alpha)) \quad (2.9)$$

Образцы для определения K_{IC} были изготовлены из крупных фрагментов раковин. После отбора образцам была придана форма, наиболее близкая к представленному расчетному варианту, в том числе с пропилом для введения клина, прямолинейной границей на противоположном крае образца (по нормали к траектории пропила) и ограничением выступов на боковых сторонах пластины образца. Вершина пропила с углом раствора около 20° дополнительно обтачивалась для создания клиновидного выступа (развилки), предназначенной для формирования концевой зоны магистральной трещины в начале нагружения (о его форме сказано выше). Подготовленные образцы показаны на рис. 3.

В ходе эксперимента образцы насаживались на клиновидное основание и сжимались в этом направлении со скоростью сближения пуансонов пресса 2 мм/мин. Ниже на рис. 4 (образец 2) и рис. 5 (образец 3) показаны характерные диаграммы нагружения, а также внешний вид образцов до и после испытания, и приведены геометрические параметры образцов.

Указанная на рисунках толщина образцов (t) относится к окрестности области инициирования магистрального разрыва (перед надрезом).

При достижении предельного равновесия в процессе нагружения трещина распространяется неустойчиво в динамическом режиме, о чем также свидетельствует вид диаграмм. Хрупкому характеру разрушения соответствует и отсутствие признаков других видов разрушения на поверхности излома. Результаты оценки K_{IC} , рассчитанного



Рис. 3. Образцы – фрагменты корпуса раковин для определения K_{IC} .

по формуле (2.9) для суммарного действия поперечных и продольных нагрузок, возникающих при внедрении клина и принятых параметров трения приведены в таблице.

По уровню трещиностойкости и характеру разрушения материал раковин обрастания близок к осадочным горным породам, таким как известняк, песчаник, сланец [13, 14]. Этот факт может быть полезным при анализе способов механического воздействия на продукты обрастания.

3. Трещиностойкость клеевого слоя. Для оценки прочности клеевого слоя между раковинной и основанием рассмотрим картину отделения раковин на одном из испытанных образцов с группой раковин (образце 2 из серии (1-1)). Вид образца до испытаний и схема участков разрушения (отделения раковин) показаны на рис. 6 (стрелки показывают направление механического воздействия P). Схема иллюстрирует последовательность событий при нагружении жестким индентором в направлении, указанном стрелкой. На снимках (рис. 7–9) видны отпечатки в клеевом слое оснований раковин круговой формы и отмечены выемки с полукруглыми границами. Представляется, что это границы смены механизмов разрушения, ориентированных по направлению вектора нагрузки. Сначала при относительно медленном изгибе срабатывает механизм частичного отделения промежуточного клеевого слоя от основания (камня) по границе контакта. При этом поверхность камня (след контакта) остается чистой (рис. 7, выемка в центре). Затем, при выходе на обозначенную полукруглую границу, происходит инициирование хрупкого разрушения – распространение трещины в клеевом слое до конца области контакта.

Судя по форме и цвету поверхности разрушения, трещина дальше идет по толще клеевого слоя, в виде расширяющегося полукруга от области, где произошло инициирование разрушения. Направление движения контура фронта разрушения (слева направо по направлению оси нагрузки) в таком режиме подтверждается конфигурацией контура отслоения на рис. 7 – участок 1 (на рис. 6b), на рис. 8 – участок 2 (там же). На рис. 8 приведена схематизация поверхности разрушения при расчете K_{IC} . Участок 3 на рис. 7 представлен на рис. 9. На нем характерный след движения трещины при выламывании раковины, (движение фронта трещины слева направо).

На рис. 10 показана схема нагружения отдельного блока (раковины) с дискообразным пятном основания, использованная при расчете максимального напряжения при инициировании разрушения клеевого слоя (рис. 10,a) и схема области контакта для

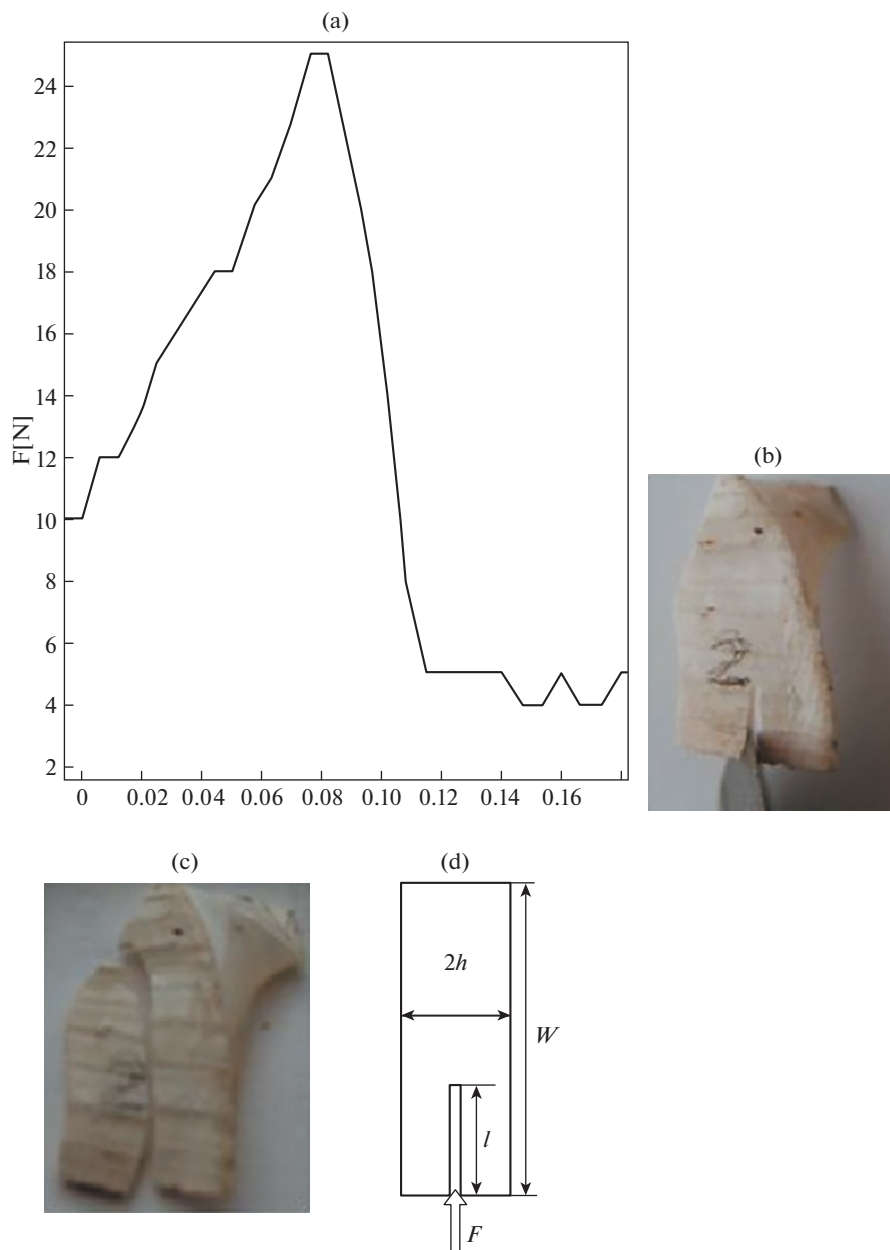


Рис. 4. Испытание образца 1: а – диаграмма испытаний, (по оси x – осевая деформация в мм, по оси y – осевое усиление), б – вид образца на клине, в – образец после испытаний, г – схема образца – ($t = 1.4$ мм, $l = 5.2$ мм, $h = 6$ мм, $w = 26$ мм).

оценки эффективной трещиностойкости клеевого слоя к моменту формирования трещины хрупкого разрушения (рис. 10, б).

Для оценки максимальных напряжений в клеевом слое на начальном этапе отделения раковины по картине разрушения принято, что оно проходит по сценарию отрыва

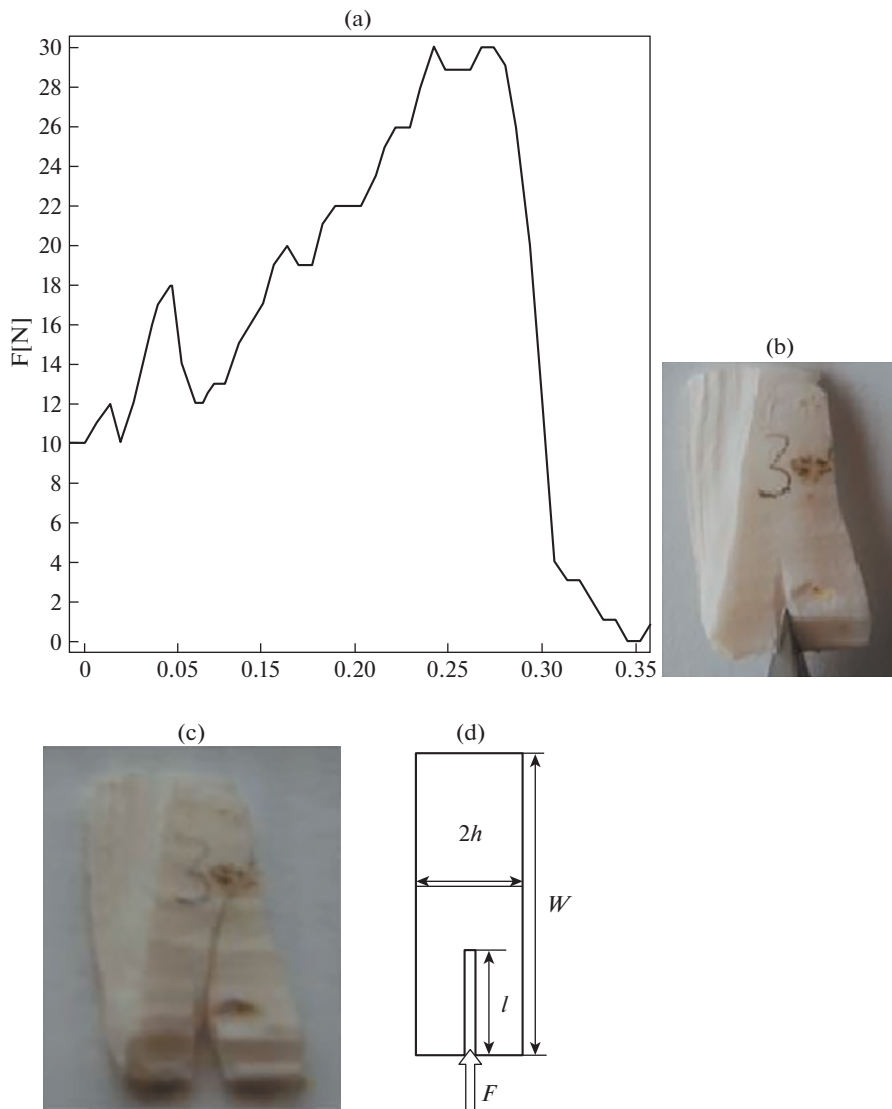


Рис. 5. Испытание образца 3: а – диаграмма испытаний, (по оси x – осевая деформация в мм, по оси y – осевое усиление), б – вид образца на клине, с – образец после испытаний, д – схема образца – ($l = 2.2$ мм, $l = 4.2$ мм, $h = 5.5$ мм, $w = 20.5$ мм).

цилиндрической консольной балки (одной раковины) от плоского основания при изгибе, вызванном поперечной силой P , приложенной к раковине на расстоянии $h \approx 10$ мм от основания (рис. 11,а). По графику изменения силы (P) при продвижении нагружающего индентора (u) для данного образца (рис. 11), на котором отражены пики нагрузок при последовательном отделении в хрупком режиме трех раковин, оценим максимальную силу $P \approx 60$ Н. Отсюда максимальный изгибающий момент, приходящийся на одну раковину (оценка сверху) $M_{\max} \approx Ph = 60 \cdot 0.01 = 0.6$ Нм.

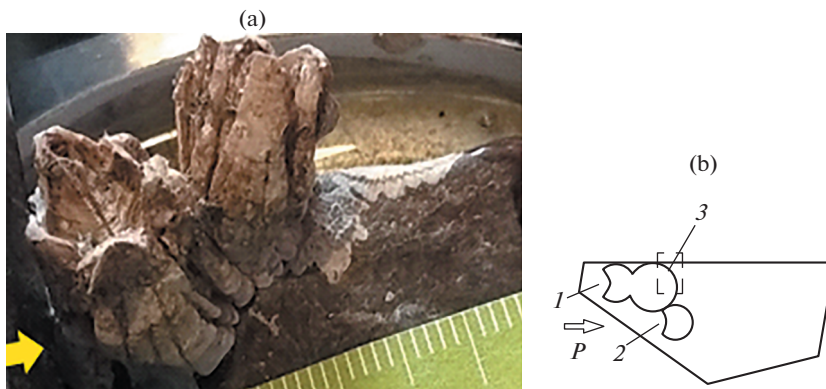


Рис. 6. Образец с группой раковин. а) Вид образца 2 из серии (1-1) до испытаний, б) схема образца после испытаний, обозначены области отделения раковин.

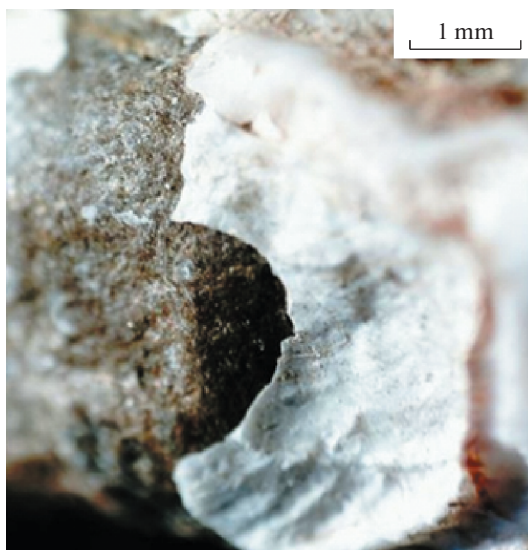


Рис. 7. Участок 1 на рис. 6.

Для эффективного цилиндрического образца – раковины с основанием диаметром $D \approx 8$ мм, величина локального максимального момента при инициировании разрушения на контуре консольно закрепленной упругой балки-цилиндра при изгибе дает оценку прочности при локальном отрыве по границе клеевого слоя (3.2).

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W}; \quad W_x = \frac{\pi D^3}{32} \approx 0.1D^3 \quad (3.1)$$

$$\sigma_{\max} \approx \frac{0.6}{0.1 \cdot 0.008^3} = 12 \text{ МПа} \quad (3.2)$$

Оценку трещиностойкости клеевого слоя получим из условия равновесия округлой начальной трещины в варианте нагружения рис. 8 и схемы на рис. 10б на этапе перехо-

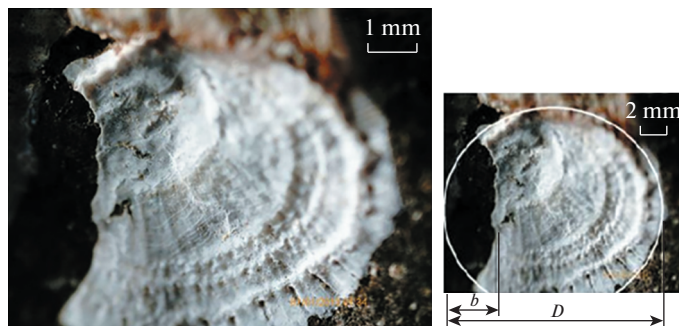


Рис. 8. Участок 2 (на рис. 6). Справа показана схематизация поверхности разрушения при расчете K_{IC} клея-вого слоя.



Рис. 9. Участок 3 (на рис. 6). След выламывания раковины (движение фронта трещины слева направо).

да к хрупкому разрушению. Используя решение задачи для поверхностной трещины в изгибаемом стержне кругового сечения [15], получим:

$$K_I = f_1 \sigma_{\max} \sqrt{\pi b} \quad (3.3)$$

Для данного образца

$$b = 2.1 \text{ мм}, \quad D = 8.2 \text{ мм}, \quad b/D = 0.256, \quad f_1(b/D) = 0.62$$

$$K_{IC} = f_1 \sigma_{\max} \sqrt{\pi b} = 0.62 \cdot 12 \sqrt{\pi \cdot 2.1 \times 10^{-3}} \approx 0.6 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0.5} \quad (3.4)$$

Таблица.

№	l (мм)	h (мм)	W (мм)	t (мм)	l/W	$f_1(\alpha)$	F (Н)	K_{IC} (МПа м ^{0.5})
1	5.2	6	26	1.4	0.20	9.15	15	1.90
2	5.5	6	24	1.2	0.23	10.18	25	4.01
3	4.2	5.5	20.5	2.2	0.20	9.15	30	2.47
4	5.5	9	15	1.3	0.36	14.6	15	2.53

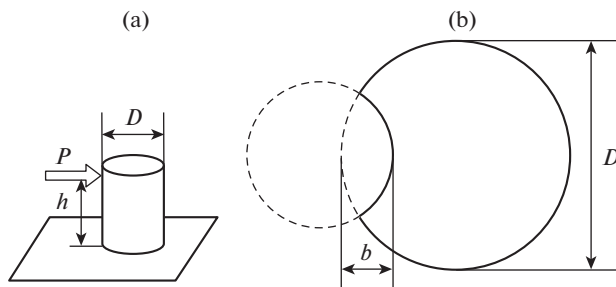
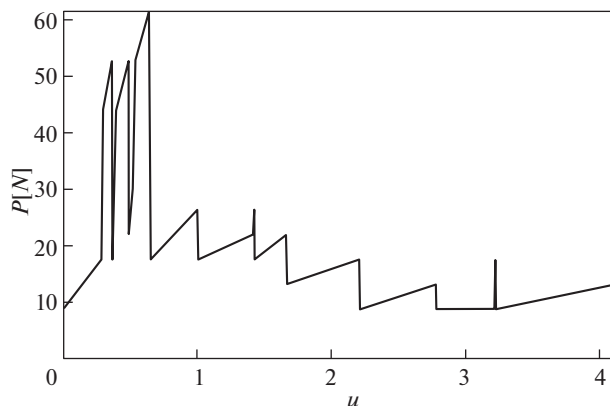


Рис. 10. Схема нагружения основания раковины (а) и вид пятна контакта (б).

4. Заключение. Проведенные эксперименты показали хрупкий характер разрушения и корпуса раковины и клеевого слоя между раковиной и субстратом. Это позволяет оценивать их сопротивляемость разрушению при развитии трещин (трещиностойкость) критическим коэффициентом интенсивности напряжений (K_{IC}). Показано, что по уровню K_{IC} ($\sim 2-4$ МПа \cdot м^{0.5}) и характеру разрушения материал раковин близок к осадочным горным породам, таким как известняк и песчаник. Клеевой слой между камнем и раковиной несколько слабее по отношению к распространению трещины, чем корпус раковины ($K_{IC} \sim 0.6$ МПа \cdot м^{0.5}). Поэтому в локальном механизме хрупкого разрушения элементов обрастания подводных конструкций, в том числе при механической обработке, преобладает разрушение клеевых слоев и отделение раковин. Вместе с тем, наличие двух вариантов локального хрупкого разрушения в разви-

Рис. 11. Диаграмма нагружения образца 2, u [mm].

той многослойной структуре обрастания при механическом воздействии может быть причиной их координированной совместной реализации, как, например, это происходит в пористых средах [16].

Автор признателен М.И. Симакову, Г.А. Колючкиной и В.Л. Сёмину за предоставленные образцы усоногих раков, а также благодарен А.Л. Попову за полезные консультации.

Работа выполнена по теме государственного задания ИПМех РАН (№ госрегистрации АААА-А20-120011690132-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звягинцев А.Ю., Полтаруха О.П., Масленников С.И. Обрастание морских систем технического водоснабжения и анализ методов защиты от обрастания в водоводах (аналитический обзор) // Вода: химия и экология. 2015. № 1. С. 37–60.
2. Омельянюк М.В. Очистка гидротехнических сооружений и плавсредств от обрастаний и наслоений // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2009. № 2. С. 45–48.
3. Коробков В.А., Левин В.С., Лукошков А.В. Подводная технология. Л.: Судостроение, 1981. 240 с.
4. Kamino K. Mini-review: Barnacle adhesives and adhesion // Biofouling. 2013. V. 29. № 6. P. 735–749. <https://doi.org/10.1080/08927014.2013.800863>
5. Zheden V., Klepal W., Gorb S.N., Kovalev A.E. Mechanical properties of the cement of the stalked barnacle *Dosima fascicularis*, (Cirripedia, Crustacea) // Interface Focus. 2015. V. 5. № 1. <https://doi.org/10.1098/rsfs.2014.0049>
6. Yule A.B., Walker G. The adhesion of the barnacle, *Balanus Balanoides*, to slate surfaces // J. Mar. Biol. Assoc. U. K. 1984. V. 64. № 1. P.147–156. <https://doi.org/10.1017/S0025315400059695>
7. Бобряков А.П., Покровский Г.Н., Серпенинов Б.Н. Определение энергозатрат при ударном расклинивании твердых тел // Вопросы механизма разрушения горных пород / Отв. ред. Е.И. Шемякин. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1976. С. 126–132.
8. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
9. Крагельский И.В., Виноградова И.Э. Коэффициенты трения. Справочное пособие. М.: Машгиз, 1962. 112 с.
10. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. Т. 1 / Под ред. Ю. Мураками. М.: Мир, 1990. 448 с.
11. Ефимов В.П., Шер Е.Н. Метод определения трещиностойкости хрупких материалов расклиниванием // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1996. № 1. С. 32–37.
12. Ефимов В.П., Мартынюк П.А., Шер Е.Н. Учет влияния вертикальных сил при расклинивании // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1992. № 3. С. 32–36.
13. Баклашов И.В. Деформирование и разрушение породных массивов. М.: Недра, 1988. 271 с.
14. Roy D.G., Singh T.N., Kodikara J., Talukdar M. Correlating the mechanical and physical properties with mode-I fracture toughness of rocks // Rock Mech. Rock Eng. 2017. V. 50. P. 1941–1946.
15. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений. Т. 2 / Под ред. Ю. Мураками. М.: Мир, 1990. 556 с.
16. Мокряков В.В., Осипенко Н.М. Моделирование упорядоченного разрушения двухмасштабной пористой среды при сжатии // Изв. РАН. МТТ. 2020. № 4. С. 115–125. <https://doi.org/10.31857/S0572329920040108>