

Камысбаева Сандугаи Мухтаровна

студент, кафедра конструкций и испытаний летальных аппаратов,

«Московский Авиационный Институт»,

РФ, г. Байконур

E-mail: kamisbaeva.04@mail.ru

Колодяжная Ирина Николаевна

научный руководитель, канд. тех. наук,

«Moscow Aviation Institute»,

РФ, г. Байконур

E-mail: kin1958@rambler.ru

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ УЯЗВИМЫХ УЧАСТКОВ СКАФАНДРА

При выходе в открытый космос одной из основных угроз для космонавтов является повреждение скафандра под действием частиц космического мусора. Особенно уязвимыми остаются подвижные зоны — локтевые, плечевые и коленные соединения. В данной работе разработан вариант применения самовосстанавливающихся материалов для защиты этих участков. Предлагается внедрение капсул с восстановительным составом в структуру защитного слоя скафандра. Рассматриваются два способа размещения капсул — в ячеистой и пористой структурах, обеспечивающих автоматическое восстановление при повреждении материала во время работы в открытом космосе.

During extravehicular activity, one of the critical risks for astronauts is the potential breach of the spacesuit's protective layers caused by high-velocity space debris. This study proposes a self-healing material system for enhancing the durability of vulnerable joint areas, such as the elbow, through the integration of microcapsules containing healing agents. Two methods of capsule incorporation—cellular and porous structures—are analyzed in terms of mass efficiency, response time, and recovery cycles. Among various candidates, selected non-Newtonian

fluids are evaluated as core substances due to their ability to transition between viscous and solid-like states upon impact, enabling autonomous sealing of microdamages.

Ключевые слова: самовосстанавливающиеся материалы, космический мусор, космический скафандр, ячеистая структура, пористая структура.

Key words: self-healing materials, space debris, spacesuit, protective coatings, cellular structure, porous structure.

Космический мусор — одна из главных угроз при выходе в открытый космос. Осколки спутников, фрагменты ракет и микрочастицы движутся с высокими скоростями и могут повредить как аппараты, так и скафандры. Даже незначительное нарушение защитного слоя может привести к серьёзным последствиям. Поэтому актуальна разработка материалов, способных не только выдерживать удары, но и восстанавливаться после повреждений.

Одним из ключевых направлений защиты скафандра является усиление локальных уязвимых зон — участков, подверженных наибольшему воздействию при движении. К ним относятся плечевые, локтевые и коленные соединения. В работе для расчётов выбрана зона локтя как наиболее подвижная и уязвимая. Повреждение в этом месте может нарушить герметичность и ограничить подвижность космонавта.

Для повышения надёжности таких зон предлагается внедрение самовосстанавливающихся капсул в структуру защитного слоя. При разрушении оболочки капсулы жидкость внутри заполняет повреждение и восстанавливает целостность материала. Это позволяет устранять микроповреждения без вмешательства человека.

Среди возможных наполнителей для таких капсул могут использоваться различные полимерные составы, включая эпоксидные смолы, силиконы и композиты с добавками. Однако наибольший интерес представляют неньютоновские жидкости, способные адаптироваться к нагрузке: при ударе они демонстрируют жёсткость, а в покое сохраняют текучесть, что делает их особенно эффективными при восстановлении микроповреждений.

Для внедрения в капсулы рассмотрены три варианта неньютоновских жидкостей:

Таблица 1.

Характеристики самовосстанавливающихся материалов

| Свойство Жидкость | Удельный вес (г/см ³) | Предел прочности (МПа) | Диапазон температур (°С) | Коэффициент адгезии |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------|
| Полиэтиленгликоль (PEG) | 1,1 | 5-10 | -60 до +200 | 0,25 |
| Нанокремнезем (суспензии наночастиц) | 2,2 | 200-400 | -100 до +1200 | 0,9 |
| Ф-ПДМС | 1,5 | 2-5 | -100 до +300 | 0,1 |

1. Расчет необходимого объема жидкости для самовосстанавливающихся капсул

Для определения требуемого объема жидкости, используемой в капсулах, приняты следующие исходные данные:

В качестве участка защиты для примера рассмотрен локоть, так как он наиболее уязвим к повреждениям при движении и работе в космосе, площадь которого равна 400 см²;

- Оптимальный диаметр 1 капсулы для размещения в материале равен $d_k = 1$ мм;
- Объем одной капсулы:

$$V_k = \frac{4}{3} \pi r^3,$$

$$V_k = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 0,05^3 = 0,0005236 \text{ см}^3$$

- Площадь, занимаемая одной капсулой:

$$S_k = \pi r^2,$$

$$S_k = 3,14 \cdot 0,05^2 = 0,00785 \text{ см}^2$$

- Количество необходимых капсул (на 1 см²):

$$n = \frac{1 \text{ см}^2}{S_k},$$

$$n = \frac{1}{0,00785} = 127 \text{ капсул}$$

- Объем необходимой жидкости (на 1 см²):

$$V_{\text{жидк}} = V_k \cdot n$$

$$V_{\text{жидк}} = 0,0005236 \cdot 127 = 0,0665 \text{ см}^3$$

- Объем необходимой жидкости (на 400 см²):

$$V_{\text{итог}} = V_{\text{жидк}} \cdot S_{\text{локтя}}$$

$$V_{\text{итог}} = 0,0665 \cdot 400 = 26,6 \text{ см}^3$$

Таким образом, объем количества жидкости, требуемое для заполнения капсул равна 26,6 см³.

2. Расчет параметров капсул для внедрения

Далее выполнен расчёт параметров капсул для каждого из представленных методов внедрения. Для сравнения были определены следующие характеристики: масса капсул, скорость восстановления повреждений и количество возможных циклов восстановления.

Масса капсул:

$$m = V_{\text{итог}} \cdot \rho_{\text{п}}$$

Скорость восстановления:

$$v = \frac{S_{\text{повр}}}{t \cdot D}$$

Количество возможных циклов:

$$N = \frac{m_{\text{жидк}}}{m_{\text{жидк для 1 повр}}},$$

где $m_{\text{жидк для 1 повр}} = V_{\text{ж}} \cdot \rho$

2.1 Внедрение капсул в ячейки

Площадь повреждения, $S_{\text{повр}} = 5 \text{ мм}^2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$

Среднее время пребывания космонавта в открытом космосе, $t = 21600 \text{ с}$

Объем жидкости при повреждении, равном 5 мм^2 :

$$V_{\text{ж}} = V_{\text{жидк}} \cdot S_{\text{повр}}$$

$$V_{\text{ж}} = 0,0665 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 0,000333 \text{ см}^3$$

Таблица 2.

Результаты расчетов параметров для ячеистой структуры

| Жидкость \ Параметр | Масса капсул, г | Скорость восстановления, м/с | Количество возможных циклов |
|--------------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------------|
| Полиэтиленгликоль (PEG) | 29,26 г | 0,231 м/с | 79945 |
| Нанокремнезем (суспензии наночастиц) | 58,82 г | 231,5 м/с | 75217 |
| Ф-ПДМС | 39,9 г | 2,315 м/с | 79800 |

2.2 Внедрение капсул в поры

Площадь повреждения, $S_{\text{повр}} = 5 \text{ мм}^2 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$

Среднее время пребывания космонавта в открытом космосе, $t = 21600 \text{ с}$

Пористость полиуретана (матрицы) – 0,545

Объем жидкости при повреждении, равном 5 мм^2 , $V_{\text{ж}} = 0,000333 \text{ см}^3$

Таблица 3.

Результаты расчетов параметров для пористой структуры

| Жидкость \ Параметр | Масса капсул, г | Скорость восстановления, м/с | Количество возможных циклов |
|--------------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------------------|
| Полиэтиленгликоль (PEG) | 239,8 | 0,0231 м/с | 653005 |
| Нанокремнезем (суспензии наночастиц) | 479,6 | 23,15 м/с | 655191 |
| Ф-ПДМС | 327 | 0,231 м/с | 654000 |

Анализ расчётных данных показал, что при использовании ячеистой структуры капсулы имеют меньшую массу и обеспечивают более высокую

скорость восстановления повреждений по сравнению с пористой структурой. Несмотря на то, что пористая система позволяет реализовать большее количество циклов восстановления, данный параметр не является определяющим в контексте эксплуатации скафандра в условиях краткосрочных или ограниченных по ресурсу миссий. С учётом совокупности факторов наиболее эффективным решением является использование ячеистой структуры с внедрением капсул, содержащих нанокремнезём, как оптимального восстанавливающего материала.

Проведённое исследование подчёркивает необходимость внедрения новых материалов и конструктивных решений для повышения надёжности скафандров в условиях открытого космоса. Применение самовосстанавливающихся защитных покрытий представляет собой перспективное направление, способствующее повышению уровня безопасности экипажа и устойчивости оборудования к микроповреждениям.

Список литературы:

1. Гольдберг Э. А., Глушко Ю. А. Космический мусор и его воздействие на космические аппараты. — М.: Наука, 2017. — 284 с.
2. Леонов В. П., Степанов И. А. Защита космической техники от микрометеоритов и космического мусора // Вестник РКК «Энергия». — 2018. — № 3 (76). — С. 45–53.
3. Жбанков В. М. Неньютоновские жидкости: физико-химические свойства и применение. — СПб.: Политехника, 2015. — 192 с.
4. Гусев А. И. Материаловедение: учебник для вузов. — М.: Лань, 2021. — 480 с.
5. Артемьев А. В., Кравченко М. И. Самовосстанавливающиеся материалы в защите космических объектов // Материалы и технологии. — 2020. — № 2. — С. 58–63.