

Деформации моделей противоударных устройств для защиты суставов

¹О.В. Денисов, ¹И.В. Топилин, ¹И.И. Еремин, ¹А.Е. Пономарев,

²И.А. Пономарева

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону

²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: В статье отражены результаты испытаний образцов на основе экваторного сплава с эффектом памяти формы. Получена система безразмерных комплексов, которые достаточно полно описывают упругопластические деформации. Установлено, что оценка влияния масштабного фактора при моделировании противоударного устройства на основе сплава с эффектом памяти формы обуславливает техническую возможность экстраполяции результатов экспериментальных исследований на иные объекты для формирования исходных данных математической модели при соблюдении условия подобия особенностей внешней нагрузки.

Ключевые слова: противоударное устройство, упругопластическая деформация, эффект памяти формы, защита суставов, масштабный коэффициент.

После обработки результатов экспериментов образцов на основе экваторного сплава с эффектом памяти формы получена система безразмерных комплексов, которые достаточно полно описывают упругопластические деформации, и показана принципиальная возможность переноса результатов эксперимента на реальные противоударные устройства.

Испытания проводились с целью получения данных для теоретических расчетов. Реализация моделирования осуществлена путем лабораторных исследований масштабных моделей [1-8].

Для получения результатов с учетом влияния масштабного фактора представим результаты испытаний моделей в виде соотношений между критериями подобия. За характерные величины можно принять: длина погонного участка, подверженного воздействию l , радиус скручивания спиралей R , величина внешнего погонного (на единицу длины) силового воздействия F , величина относительной линейной деформации

экспериментальной модели противоударного устройства φ , величина относительной линейной деформации модели противоударного устройства в упругой зоне φ_{Π} , интегральный предел прочности материалов модели противоударного устройства в зоне упругой деформации G , интегральный предел прочности материалов модели противоударного устройства в зоне упругопластической деформации Φ . В результате получим следующий список основных параметров:

$$F, l, R, G, \Phi, \varphi, \varphi_{\Pi} \quad (1)$$

Матрица размерностей, согласно теории подобия [8], имеет вид

$$\begin{vmatrix} 2 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ -2 & 0 & 0 & -2 & -2 \end{vmatrix}. \quad (2)$$

причем φ и φ_{Π} в матрицу размерностей не включены.

Количество независимых безразмерных отношений параметров, связанных с этой матрицей, равно $n - r = 5 - 2 = 3$, где r – ранг матрицы (2).

Для составления системы безразмерных комплексов имеем матрицу решений

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & -3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Используя (3) и временно отброшенные φ и φ_{Π} , представим систему безразмерных комплексов – критериев подобия в форме

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{F}{GR^3}, \quad \Pi_2 = \frac{l}{R}, \quad \Pi_3 = \frac{G}{\Phi}, \\ \Pi_4 &= \varphi, \quad \Pi_5 = \varphi_{\Pi}. \end{aligned} \quad (4)$$

Инвариантность критериев подобия $\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_5$ для модели и природы, равносильна требованию геометрического подобия объектов.

При этом P_1 можно рассматривать как простейший закон подобия, аналогичный формулировке Кирпичева – Барба – Кика [9-11]. Геометрически подобные $l/R = \text{const}$ и подобно нагруженные внешним погонным силовым воздействием F из одних тех же материалов получают одинаковые касательные напряжения и сдвиговые деформации, если величина внешнего погонного силового воздействия F пропорциональна радиусам спиралей.

Примем в качестве основного характерного размера радиус спиралей R и выразим длину погонного участка, подверженного воздействию l экспериментального образца 1 и природы 2 через основной:

$$L_i = K_i R_i, \quad i = 1, 2. \quad (5)$$

Поэтому можно предположить, что:

$$\frac{l_1}{R_1} = \frac{l_2}{R_2} = K_1 = K_2 = K. \quad (6)$$

Пользуясь (6), можно представить систему уравнений упругопластической деформации моделей в форме

$$F_i = \frac{\pi}{2K} D_i, \quad i = 1, 2, \dots$$
$$D_i = \begin{cases} G_i R_i^3 \varphi_i, & \varphi_i < \varphi_{ni} \\ G_i R_i^3 \left[\frac{4}{3} \left(\varphi_{ni} - \frac{4\varphi_{ni}^4}{\varphi_i^3} \right) + \frac{\Phi_i}{G_i} (\varphi_i - \varphi_{ni}) \left(1 - \frac{\varphi_{ni}^4}{\varphi_i^3} \right) + \frac{\varphi_{ni}^4}{\varphi_i^3} \right], & \varphi_i \geq \varphi_{ni}. \end{cases} \quad (7)$$

Вводя для геометрически подобных образцов 1 и 2 масштабы радиусов спиралей R_0 , величины относительной линейной деформации φ_0 , интегральные пределы прочности материалов модели противоударного устройства в зонах упругой и упругопластической деформаций G_0 и Φ_0

$$R_0 = \frac{R_1}{R_2}; \quad \varphi_0 = \frac{\varphi_1}{\varphi_2}; \quad G_0 = \frac{G_1}{G_2};$$
$$\Phi_0 = \frac{\Phi_1}{\Phi_2}; \quad \varphi_{\text{по}} = \frac{\varphi_{\text{п1}}}{\varphi_{\text{п2}}}, \quad (8)$$

ограничимся рассмотрением условия внешнего нагружения моделей, при котором остаются постоянными отношения приложенных внешних погонных силовых воздействий:

$$\frac{F_1}{F_2} = F_0 = \text{const}. \quad (9)$$

Пользуясь масштабами (8), условием простого нагружения торсионов (9), геометрическим подобием, можно придать уравнениям (7) окончательную форму в безразмерном виде:

$$\frac{F_0 F_2}{G_0 R_0^3 G_2 R_2^3} = \frac{\pi \phi_0 \phi_2}{2K} \quad \text{при } \phi_0 \phi_2 < \phi_{\text{по}} \phi_{\text{п2}}. \quad (10)$$

$$\frac{F_0 F_2}{G_0 R_0^3 G_2 R_2^3} = \frac{\pi}{2K} \left[\begin{aligned} & \frac{4}{3} \left(\phi_{\text{по}} \phi_{\text{п2}} - \frac{(\phi_{\text{по}} \phi_{\text{п2}})^4}{4(\phi_{\text{по}} \phi_{\text{п2}})^3} \right) + \\ & + \frac{\Phi_0 \Phi_2}{G_0 G_2} \times (\phi_0 \phi_2 - \phi_{\text{по}} \phi_{\text{п2}}) \times \\ & \times \left(1 - \frac{(\phi_{\text{по}} \phi_{\text{п2}})^4}{4(\phi_{\text{по}} \phi_{\text{п2}})^4} + \frac{(\phi_{\text{по}} \phi_{\text{п2}})^4}{(\phi_{\text{по}} \phi_{\text{п2}})^3} \right) \end{aligned} \right] \quad \text{при } \varphi_0 \varphi_2 \geq \varphi_{\text{по}} \varphi_{\text{п2}}; \quad (11)$$

$$\frac{F_2}{G_2 R_2^3} = \frac{\pi \phi_2}{2K} \quad \text{при } \phi_2 < \phi_{\text{п2}}; \quad (12)$$

$$\frac{F_2}{G_2 R_2^3} = \frac{\pi}{2K} \left[\begin{aligned} & \frac{4}{3} \left(\phi_{\text{п2}} - \frac{\phi_{\text{п2}}^4}{4\phi_2^3} \right) + \frac{\Phi_2}{G_2} (\phi_2 - \phi_{\text{п2}}) \times \\ & \times \left(1 - \frac{\phi_{\text{п2}}^4}{\phi_2^4} \right) + \frac{\phi_{\text{п2}}^4}{\phi_2^3} \end{aligned} \right] \quad \text{при } \varphi_2 \geq \varphi_{\text{п2}}. \quad (13)$$

В том случае, если масштабы (8) не являются произвольными, а выбраны таким образом, что

$$\frac{F_0}{G_0 R_0^3} = 1; \quad \frac{\phi_0}{\phi_{\text{по}}} = 1; \quad \frac{G_0}{\Phi_0} = 1; \quad \frac{l_0}{R_0} = 1, \quad (14)$$

одноименные уравнения (10) и (12), (11) и (13) тождественно совпадают. Соотношения (14) при этом позволяют по заданным характеристикам одного образца получить характеристики другого простым перерасчетом.

Действительно, согласно (8) и (14)

$$\frac{F_1}{G_1 R_1^3} = \frac{F_2}{G_2 R_2^3}; \quad \frac{F_1}{F_2} = \left[\frac{G_1}{G_2} \right] \left[\frac{R_1}{R_2} \right]^3 \dots \quad (15)$$

В соответствии с условиями подобия (4) обработка результатов испытаний моделей торсионов производилась в критериальной форме

$\frac{F}{GR^3} = f\left(\frac{l}{R}, \frac{\Phi}{G}, \phi, \phi_{II}\right)$. В экспериментах с моделями образцов противоударных

устройств, выполненных на основе сплава с эффектом памяти формы [6]

варьировалось безразмерное отношение $\Pi_2 = \frac{l}{R}$. Остальные критерии

подобия сохраняли постоянное значение: $\Pi_3 = 0,1$, $\Pi_4 = \Pi_5 = 0,56$. На рис.1

для отмеченных фиксированных значений критериев подобия по результатам

нескольких опытов построено простое критериальное уравнение $\frac{F}{GR^3} = f\left(\frac{l}{R}\right)$.

По мере уменьшения параметра Π_2 нелинейный эффект от пластического упрочнения вырождается.

Отмечено удовлетворительное совпадение критериев в заданной области деформирования. Несовпадения для модельных образцов составляют не более 15 %. Они могут быть объяснены различием нелинейности упрочнения при упругопластических деформациях в моделях на основе сплава с феноменальными свойствами. Нелинейность критериальной зависимости в данном случае является следствием особенного и случайного характера внешних сил, приложенных к моделям.

При испытании моделей изменение температуры нагрева образцов также может существенно влиять на механические свойства сплава с эффектом памяти формы. Выбор оптимальных управлений и параметров

моделей проведен при варьировании l, R, φ_{II}, G таким образом, чтобы обеспечить изменчивость критериев подобия Π_2 и Π_5 .

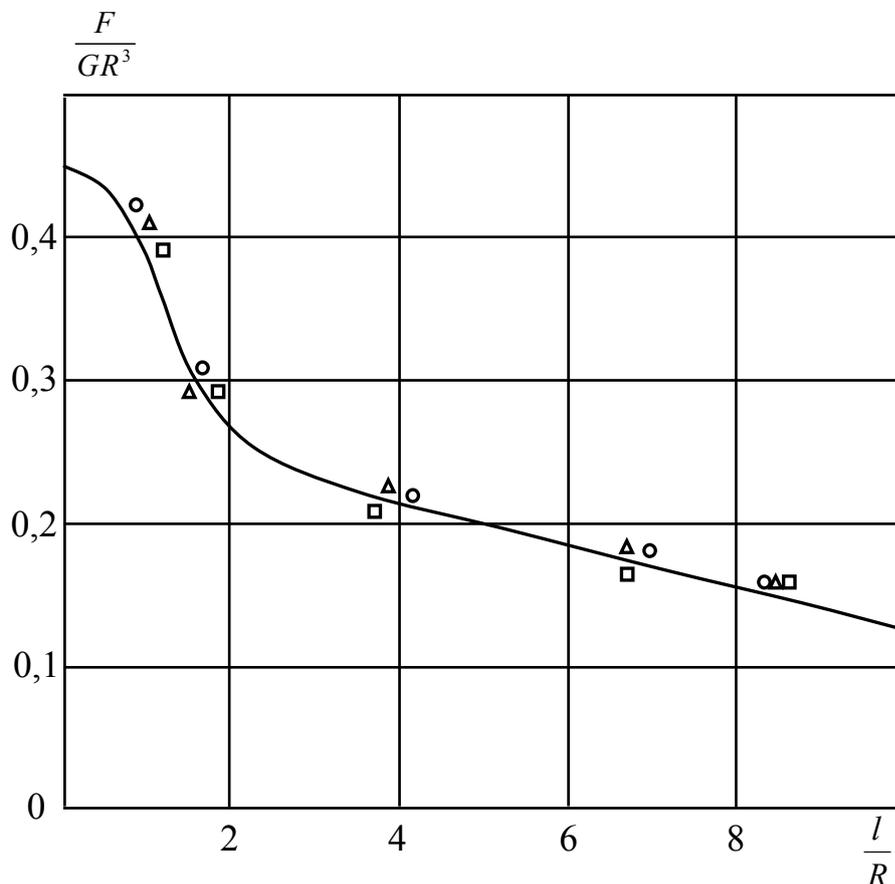


Рис.1– Экспериментальные значения безразмерной силовой характеристики моделей в критериальной форме

$$\Delta - R = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \text{ O} - R = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \square - R = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Обработка экспериментов в широком диапазоне температур проводилась в критериальной форме $\frac{M_{кр}}{GR^3} = f\left(\frac{l}{R}, \varphi_{II}\right)$.

На рис.2 представлены результаты испытаний моделей в широком диапазоне температур при фиксированном отношении $\Pi_2 = 5,12, \Pi_3 = 0,1, \Pi_4 = 1,53$. Основные примененные материалы моделей –

титано-никелевый сплав с эффектом памяти формы ТН-1 и полиуретановая основа.

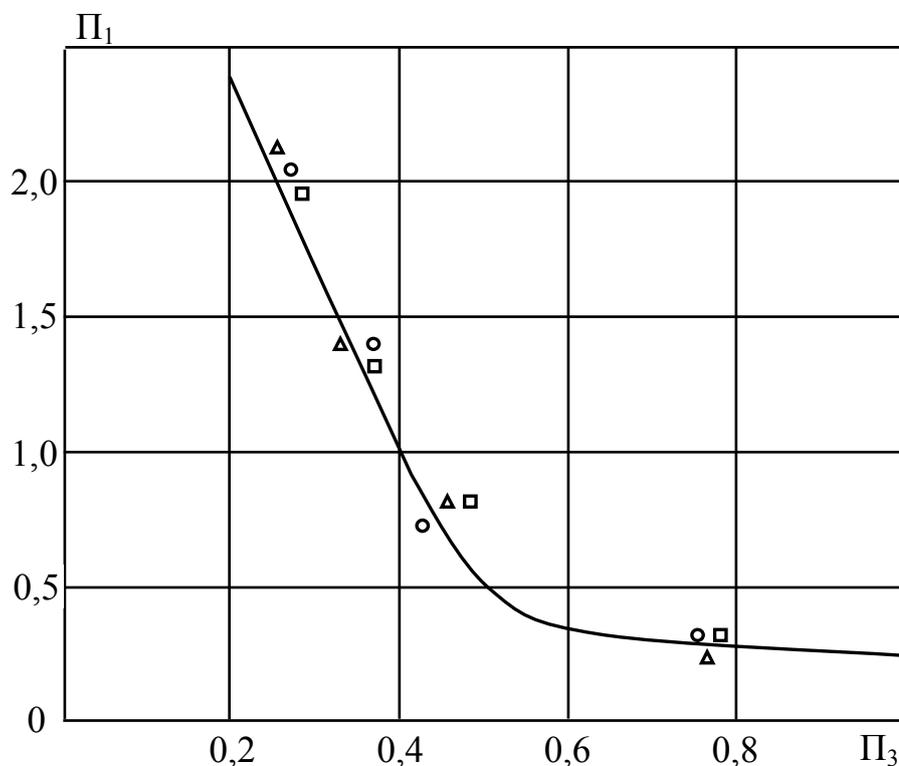


Рис.2– Экспериментальная зависимость значений безразмерной силовой характеристики модели $\Pi_1 = FG^{-1}R^{-3}$ от величины относительной деформации

$$\Pi_3 = \varphi_{\Pi} \Delta - R = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \text{ O} - R = 4,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \square - R = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Таким образом, оценка влияния масштабного фактора при моделировании противоударного устройства на основе сплава с эффектом памяти формы обуславливает техническую возможность экстраполяции результатов экспериментальных исследований на иные объекты для формирования исходных данных математической модели динамики упругопластической деформации противоударных устройств при соблюдении условия подобия особенностей внешней нагрузки.



Литература

1. Денисов О.В., Булыгин Ю.И., Пономарев А.Е.К вопросу о противоударной экипировке в профессиях, связанных с повышенным риском // Инновационные технологии в науке и образовании: Сборник научных трудов научно-методической конференции, посвященной 85-летию ДГТУ. – Ростов н/Д, 2015. – С. 510-516.

2. Денисов О.В., Пономарева И.А., Зименко В.А. Защитная повязка для крупных суставов при занятиях спортом // Новые стандарты модернизации педагогического образования в формировании здорового образа жизни и безопасности жизнедеятельности: Материалы III Региональной научно-практической конференции Южного федерального округа. – Краснодар, 2015. – С. 90-92.

3. Денисов О.В., Ступаков В.Я., Костоглотов А.И., Шевцова Л.А. Масштабный фактор при упругопластическом кручении торсионов на основе сплава с эффектом памяти формы // Известия вузов. Естественные науки. – 1999. – №4. – С. 21-24.

4. Еремин И.И., Денисов О.В. Об испытаниях опытной модели элемента противоударной экипировки водителей автотранспорта (Часть 2) // Инженерный вестник Дона, 2015, №2 ч.2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3062.

5. Костоглотов А.И., Денисов О.В., Ступаков В.Я., Шевцова Л.А. Экспериментальное исследование механических свойств титано-никелевого сплава с эффектом памяти формы при повышенных температурах и пластическом кручении // Известия вузов. Естественные науки. – 1999. – №4. – С. 24-26.

6. Месхи Б.Ч., Денисов О.В., Булыгин Ю.И., Пономарев А.Е., Пономарева И.А. Противоударное приспособление: патент на изобретение / RUS2578997 – 20.08.2014.

7. Топилин И.В., Маяцкая И.А. Сплавы с памятью формы в кузовах автомобилей: инновации или фантастика // Инженерный вестник Дона, 2015, №2 ч.2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3060.

8. Топилин И.В., Пономарева И.А. Об испытаниях опытной модели элемента противоударной экипировки водителей автотранспорта (Часть 1) // Инженерный вестник Дона, 2015, №2 ч.2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3066.

9. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч.1. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.

10. A. Beskopylny, A. Veremeenko, B. Yazyev. Metal structures diagnosis by truncated cone indentation. MATEC Web of Conferences Vol.106, 04004, 2017, 9 p.

11. A.S. Chepurnenko, V.I. Andreev, A.N. Beskopylny, B.M. Jazyev. Determination of Rheological Parameters of Polyvinylchloride at Different Temperatures. MATEC Web of Conferences, Vol.67, 06059, 2016, 6 p.

References

1. Denisov O.V., Bulygin Yu.I., Ponomarev A.E. К вопросу о противударной экипировке в профессиях, связанных с повышенным риском. Innovatsionnyye tekhnologii v nauke i obrazovanii: Sbornik nauchnykh trudov nauchno-metodicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 85-letiyu DGTU. [To the question of shock-proof equipment in occupations associated with an increased risk]. Rostov n/D, 2015. pp. 510-516.
2. Denisov O.V., Ponomareva I.A., Zimenko V.A. Noveye standarty modernizatsii pedagogicheskogo obrazovaniya v formirovanii zdorovogo obraza zhizni i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: Materialy III

- Regional'noynauchno-prakticheskoy konferentsii Yuzhnogo federal'nogo okruga. Krasnodar, 2015. pp. 90-92.
3. Denisov O.V., Stupakov V.Ya., Kostoglotov A.I., Shevtsova L.A. Izvestiya vuzov. Estestvennye nauki. 1999. №4. pp. 21-24.
 4. Eremin I.I., Denisov O.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №2, part 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3062.
 5. Kostoglotov A.I., Denisov O.V., Stupakov V.Ya., Shevtsova L.A. Izvestiya vuzov. Estestvennye nauki. 1999. №4. pp. 24-26.
 6. Meskhi B.Ch., Denisov O.V., BulyginYu.I., Ponomarev A.E., Ponomareva I.A. Protivoudarnoe prispособlenie: patent na izobretenie [Shockproof device: patent for invention]. RUS 2578997. 20.08.2014.
 7. Topilin I.V., Mayatskaya I.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №2, part 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3060.
 8. Topilin I.V., Ponomareva I.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №2, part 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3066.
 9. Fridman Ya.B. Mekhanicheskie svoystva metallov. Ch.1. Deformatsiya i razrushenie [Deformation and fracture]. M.: Mashinostroenie, 1974, 472 p.
 10. A. Beskopylny, A. Veremeenko, B. Yazyev. Metal structures diagnosis by truncated cone indentation. MATEC Web of Conferences, Vol.106, 04004, 2017, 9 p.
 11. A.S. Chepurnenko, V.I. Andreev, A.N. Beskopylny, B.M. Jazyev. Determination of Rheological Parameters of Polyvinylchloride at Different Temperatures. MATEC Web of Conferences, Vol.67, 06059, 2016, 6 p.
-