

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА

*Мамазакиров О.¹, Марченко Е.С.¹, Клопотов А.А.^{1,2}, Ясенчук Ю.Ф.¹,
Устинов А.М.²*

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет;

²Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск

Ключевые слова: никелида титана, деформация сжатием, пористый материал, Vic-3D система.

Аннотация. В статье представлены данные, полученные при изучении эволюции полей деформации на поверхности пористого никелида титана методом корреляции цифровых изображений при одноосном сжатии. Установлено, что деформационные кривые, построенные в координатах σ от ϵ , отражают особенности деформации пористого сплава на основе никелида титана и коррелируют с распределениями деформационных полей на поверхности пористых образцов.

DEFORMATION FEATURES OF A POROUS TITANIUM NICKEL BASED MATERIAL

*Marchenko E.S.¹, Mamazakirov O.¹, Klopotov A.A.^{1,2}, Yasenchuk Yu.F.¹,
Ustinov A.M.²*

¹National research Tomsk state university;

²Tomsk state university of architecture and civil engineering, Tomsk

Keywords: titanium nickelide, compression deformation, porous material, Vic-3D system.

Abstract. The article presents data obtained in the study of the evolution of deformation fields on the surface of porous titanium nickelide by the digital image correlation method under uniaxial compression. It has been established that the deformation curves plotted in the coordinates σ from ϵ reflect the features of the deformation of a porous alloy based on titanium nickelide and correlate with the distributions of deformation fields on the surface of porous samples.

Введение

Пористые сплавы на основе никелида титана полученные методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) являются перспективными материалами для костной пластики благодаря сверхэластичности и высокой коррозионной стойкости [1]. Выполненные из этих сплавов имплантаты в живом биологическом организме подвергаются сложному нагружению, которое включает сжатие, растяжение и сдвиг. Но даже при одноосном растяжении пористого образца его 3D-каркас с хаотически расположенными перемычками испытывает все виды деформации. Пористый каркас состоит из вязких, квазихрупких и хрупких фаз. В таких условиях неоднородного фазового и концентрационного состава, неоднородного распределения напряжений, деформации, сверхэластичная деформация никелида титана может быть реализована лишь локально. Тем не менее, на макроскопическом уровне образцы пористого сплава проявляют и сверхэластичность, и память формы, свойственные никелиду титана [1-3].

Пористый сплав на основе никелида титана относится к классу материалов, в котором при деформации проходит широкий набор процессов [3]. Это значительно усложняет прогнозирование деформационного поведения пористого никелида титана, а экспериментальные исследования, направленные на изучение закономерностей распределения деформации в пористом сверхэластичном никелиде титана, предназначенном для медицинского применения, приобретают большую актуальность.

Целью данной работы является исследование эволюции полей деформации на поверхности пористого никелида титана методом корреляции цифровых изображений при одноосном сжатии.

Материалы и методы. Пористый сплав никелида титана получали методом СВС. Затем из этого слитка электроэрозионным методом вырезали орторомбической формы образцы $a \times b \times c$ ($a=33$ мм, $b=20$ мм, $c=5$ мм). Испытания пористых образцов на одноосное сжатие проводили на испытательной машине INSTRON 3386 со скоростью деформирования $0,001 \text{ с}^{-1}$.

Прямоугольные образцы деформировали одноосным сжатием двумя способами. Первый способ деформации – ось сжатия вдоль стороны a образца (рис. 1а). Второй способ – ось сжатия вдоль стороны образца b (рис. 1б).

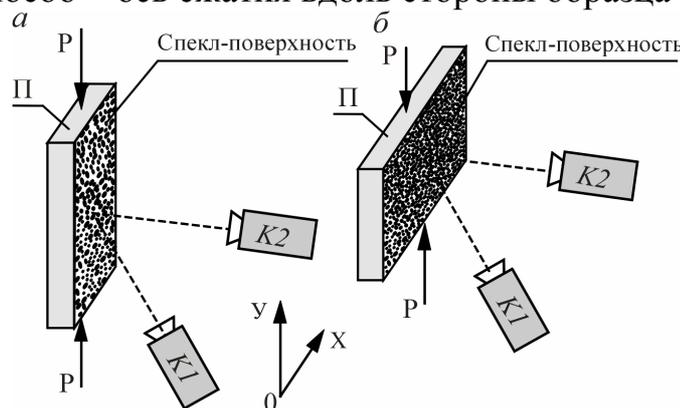


Рис. 1. Схема деформации на сжатие пористых пластин (П) из никелида титана при регистрации изображений со спекл-поверхностей. a – ось сжатия вдоль длины образца; b – ось сжатия вдоль ширины образца; $K1$ и $K2$ – цифровые камеры; P – прикладываемая нагрузка

Усредненную деформацию в пределах рабочей части исследуемого образца от верхнего до нижнего зажима испытательной машины определяли с использованием оптической системы Vic-3D [4]. Для исследования эволюции деформационных полей при помощи оптической системы VIC-3D на поверхность образцов перед испытаниями наносили множество контрастных точек [5].

Результаты и обсуждение. На рисунке 2 приведены деформационные кривые сжатия пористых образцов из сплава на основе никелида титана с разным расположением прямоугольных образцов относительно одноосной оси деформации. Видно, что предел прочности образца при сжатии вдоль стороны образца b на 25% больше, чем для образца, продеформированного с осью сжатия вдоль стороны a образца.

На распределениях деформационных полей вертикальном направлении при одноосном сжатии с осью деформации вдоль стороны a образца видно, что

области верхнего подвижного захвата образуются локальные очаги пластической деформации в виде слоев, перпендикулярно расположенные относительно вертикальной оси (рис. 3, картины 1 и 2). Эти очаги пластической деформации по мере роста внешнего приложенного напряжения смещаются в центр образца (рис. 3, картина 3). При достижении деформации порядка 5% происходит изменение геометрической формы образца. На стадии предразрушения при деформации $\langle \epsilon_{YY} \rangle = 7,33\%$ наглядно видно, что отдельные слоистые очаги пластической деформации начинают сливаться в один большой очаг деформации в центральной части образца. Также на этой стадии наблюдается образование локальных очагов деформации расширения (рис. 3, картина 4).

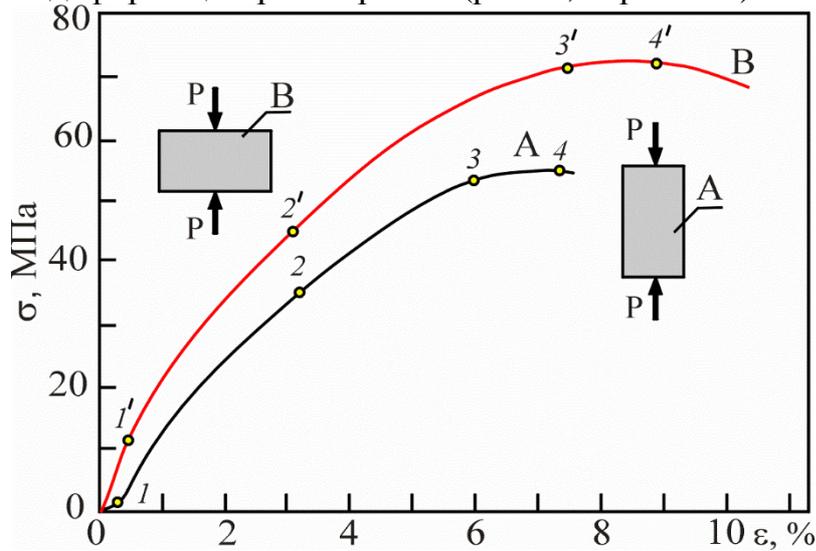


Рис. 2. Деформационные кривые сжатия пористых образцов из сплава на основе никелида титана: *кривая А* – образец с осью сжатия вдоль длины образца; *кривая В* – образец с осью вдоль ширины образца

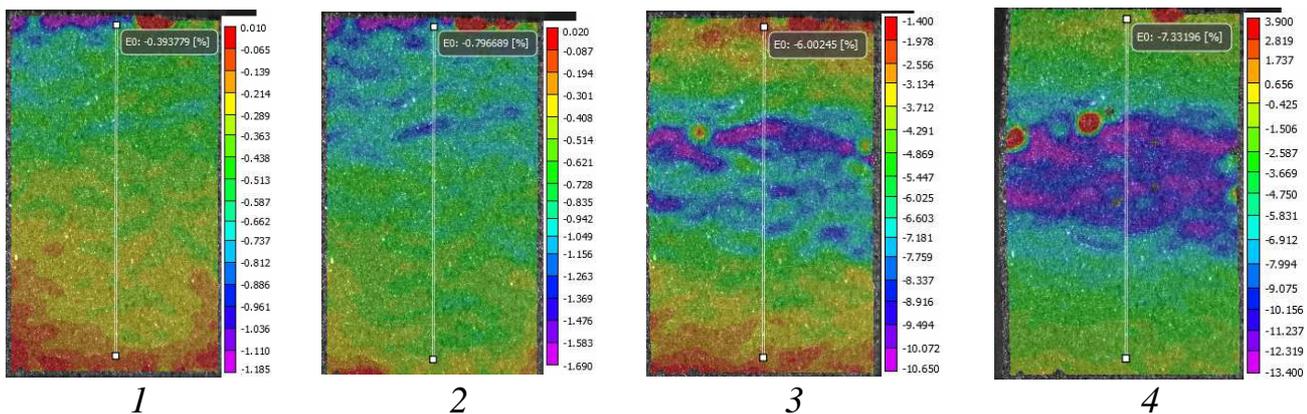


Рис. 3. Картины распределений вертикальных относительных деформаций ϵ_{YY} на поверхности пористого образца из сплава на основе никелида титана: *1* – $\langle \epsilon_{YY} \rangle = 0,39\%$; *2* – $\langle \epsilon_{YY} \rangle = 3,2\%$; *3* – $\langle \epsilon_{YY} \rangle = 6,0\%$; *4* – $\langle \epsilon_{YY} \rangle = 7,33\%$; этим картинам соответствуют точки 1 – 4 на деформационной кривой А на рисунке 2

На распределениях деформационных полей вертикальном направлении при одноосном сжатии с осью деформации вдоль стороны *b* образца видно, что локальные очаги пластической деформации в основном образуются в центральной части образца и располагаются в вид слоев, вытянутых

перпендикулярно к оси сжатия (рис. 4, картины 1 и 2). Эти очаги пластической деформации по мере роста внешнего приложенного напряжения концентрируются в центральной части образца, располагаются по диагонали и начинают сливаться в обширные области (рис. 4, картина 3) На стадии предразрушения при деформации $\langle \epsilon_{YY} \rangle = 8.84\%$ наглядно видно, что отдельные слоистые очаги пластической деформации начинают сливаться в один большой очаг деформации в центральной части образца.

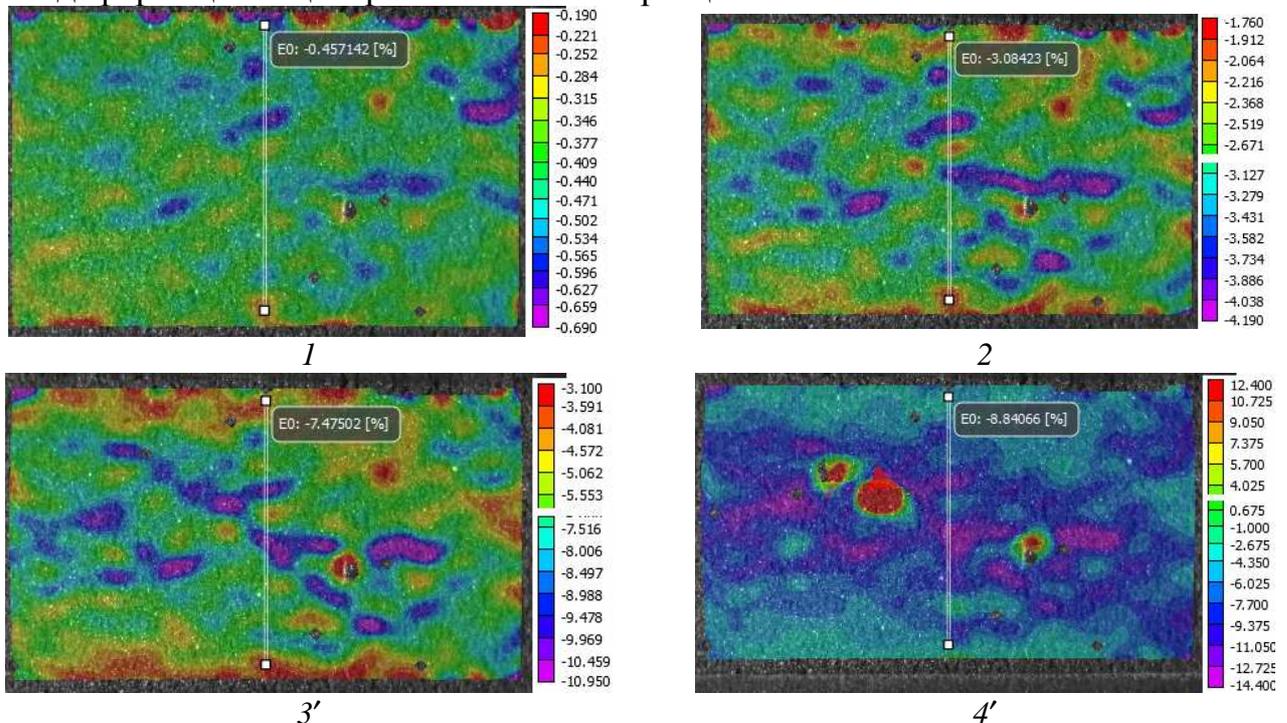


Рис. 4. Картины распределений вертикальных относительных деформаций ϵ_{YY} на поверхности пористого образца из сплава на основе никелида титана:

1' – $\langle \epsilon_{YY} \rangle = 0,45\%$; 2' – $\langle \epsilon_{YY} \rangle = 3,08\%$; 3' – $\langle \epsilon_{YY} \rangle = 7,43\%$; 4' – $\langle \epsilon_{YY} \rangle = 8,84\%$; этим картинам соответствуют точки 1' – 4' на деформационной кривой В на рисунке 2

Заключение

1. Установлено, что предел прочности и эволюция распределений деформационных полей при одноосном сжатии пористых образцов сплава на основе никелида титана зависит от геометрии расположения образцов относительно оси деформации.

2. Показано, что характер диаграммы σ – ϵ отражает процессы схлопывания межпорового пространства в пористом сплаве на основе никелида титана и коррелирует с особенностями распределений деформационных полей на поверхности пористых образцов.

3. Экспериментально полученные диаграммы деформирования и соответствующие картины распределения деформационных полей могут быть применены для верификации конечно-элементных моделей при выполнении численных расчетов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10037, <https://rscf.ru/project/22-72-10037/>

Список литературы

1. Yasenchuk Y., Marchenko E., Gunther V., Radkevich A., Kokorev O., Gunther S., Baigonakova G., Hodorenko V., Chekalkin T., Kang J.H. et al. Biocompatibility and Clinical Application of Porous TiNi Alloys Made by Self-Propagating High-Temperature Synthesis (SHS) // Mater. 2019, vol. 12(15), p. 2405.
2. Marchenko E.S., Baigonakova G.A., Yasenchuk Y.F., Chekalkin T.L., Volinsky A.A. Structure, biocompatibility and corrosion resistance of the ceramic-metal surface of porous nitinol // Ceramics International. 2022, vol. 48(12), pp. 33514-33523.
3. Yasenchuk Yu.F., Marchenko E.S., Baigonakova G.A., Gyunter S.V., Kokorev O.V., Gunther V.E., Chekalkin T.L., Topol`nickij E.B., Obrosov Aleksei, Kang Ji-Hoon. Study on tensile, bending, fatigue, and in vivo behavior of porous SHS-TiNi alloy used as a bone substitute // Biomedical Materials. 2021, vol. 16, iss. 2, p. 021001.
4. Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements. University of South Carolina. – Columbia, SC, USA, 2009. – 364 p.
5. Ustinov A.M., Klopotov A.A., Potekayev A.I., Abzaev Yu.A., Plevkov V.S. Experimental study of the stress-strain state of surface layers of CFRP in axial tension using the digital image correlation method // Proceedings of the Altai State University. 2018, no. 1, pp. 58-69.

Сведения об авторах:

Мамазакиров Ойбек – студент;

Марченко Екатерина Сергеевна – д.ф.-м.н., заведующий лабораторией медицинских сплавов и имплантатов с памятью формы;

Клопотов Анатолий Анатольевич – д.ф.-м.н., профессор;

Ясенчук Юрий Федорович – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории медицинских сплавов и имплантатов с памятью формы;

Устинов Артём Михайлович – к.т.н., старший преподаватель.