

УДК 669.018.2

**ЦИКЛИЧЕСКАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СПЛАВОВ НИКЕЛИДА ТИТАНА
С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ**

М.А.Хусаинов, В.А.Андреев*

FATIGUE LIFE OF TITANIUM-NICKELIDE SHAPE MEMORY ALLOYS

M.A.Khusainov, V.A.Andreev*

*Политехнический институт НовГУ, Mikhail.Khusainov@novsu.ru
ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ», andreev.icmateks@gmail.com

Изучены особенности механического поведения проволочных образцов из никелида титана в псевдоупругом состоянии при циклическом нагружении, в режимах симметричного изгиба и изгиба с кручением. Приведены зависимости числа циклов от деформации нагружения. Показано, что наиболее жестким режимом нагружения является циклический изгиб с кручением. Микрофрактографическими исследованиями установлен характер разрушения исследуемых сплавов при механоциклировании по указанным режимам.

Ключевые слова: никелид титана (TiNi), псевдоупругость (сверхупругость), микрофрактография, симметричный изгиб, изгиб с кручением

We studied the specifics of mechanical behavior of pseudoelastic titanium-nickelide wire specimens at cycling, symmetric bending, and bending with torsion. This paper presents the dependencies of the number of cycles on the deformation. It is shown that

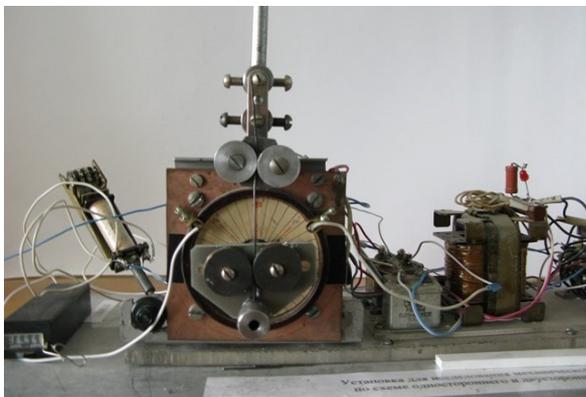
cyclic bending with torsion is the hardest mode of loading. Using microfractography, we found fracture patterns of the studied alloys subjected to the mechanical cycling modes mentioned.

Keywords: titanium nickelide (TiNi), pseudoelasticity (superelasticity), microfractography, symmetric bending, bending with torsion

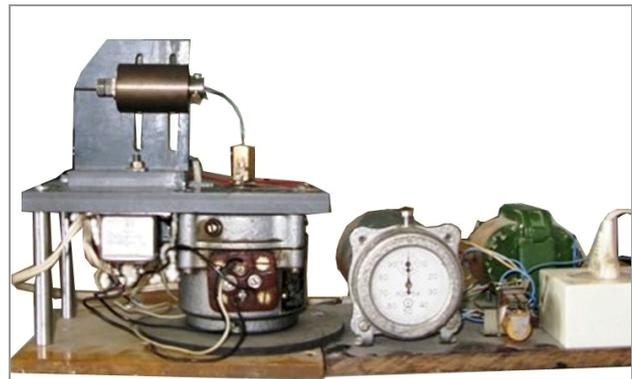
Сплавы никелида титана (TiNi), обладающие эффектом памяти формы, находят широкое применение в технике (антенны широкого назначения) и медицине (катетеры) [1,2] вследствие способности данных материалов работать в условиях циклического нагружения. Особый интерес представляют псевдоупругие (сверхупругие) сплавы TiNi, многократно упруго восстанавливающие форму при значительных деформациях нагружения (> 6%).

Исследования проводились на проволочных образцах диаметром 1,0 мм двух составов — TiNiCr с массовой долей хрома 0,2% и никелид титана, обогащенный никелем (Ti-50,68at%Ni). Проволока, полученная на предприятии «Промышленный центр МАТЭК-СПФ» (Москва), поставлялась в бухтах после горячего волочения. Поэтому проволока в исходном состоянии криволинейная, тогда как в реальных условиях должна быть прямолинейной. Для решения этой задачи проводилась дополнительная термомеханическая обработка на разрывной машине Р-0,5 с нагревательным устройством по режиму прямого отжига [3], включающим нагрев до 500°C с выдержкой при этой температуре три минуты и последующем деформировании до одного-трех процентов. Такой вид ТМО повышает прочность сплава и обеспечивает прямолинейность проволочных образцов.

Условия циклического нагружения прямолинейных образцов создавались на изготовленных нами двух установках (рис.1).



a



b

Рис.1. Автоматизированные установки для механического циклирования проволочных образцов из сплавов с эффектом памяти формы

За циклическую долговечность принималось число циклов до усталостного разрушения при заданной деформации нагружения по режиму симметричного (двухстороннего) изгиба проволочного образца на установке (рис.1a) и одновременного изгиба с кручением на установке (рис.1b). Длительность одного цикла в первом случае составляла 10 секунд и во втором режиме — 2 секунды.

Результаты испытаний, изображенные в виде кривых усталости в логарифмических координатах, приведены на рис.2.

Из сопоставления двух режимов циклического нагружения проволочных образцов одновременный изгиб с кручением оказался наиболее жестким для обоих сплавов. В то же время циклическая долговечность сплава TiNiCr существенно ниже, чем никелида титана без хрома, независимо от режима нагружения. Возможно, это связано с образованием малопрочных выделений в виде $Ti_3(NiCr)_4$ [4], ослабляющих рабочее сечение образцов в процессе циклического нагружения. Доказательством этому является более низкое сопротивление усталости сплава TiNiCr по сравнению со сплавом Ti-50,68at%Ni, несмотря на достаточно высокий уровень механических свойств сплава TiNiCr (рис.3).

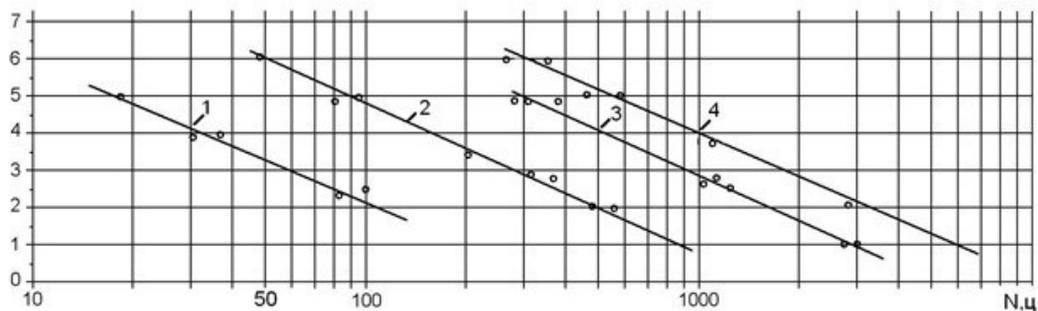


Рис.2. Кривые механоциклической усталости сплавов никелида титана: 1) TiNiCr — изгиб с кручением; 2) TiNiCr — симметрический изгиб; 3) Ti-50,68at%Ni — изгиб с кручением; 4) Ti-50,68at%Ni — симметрический изгиб

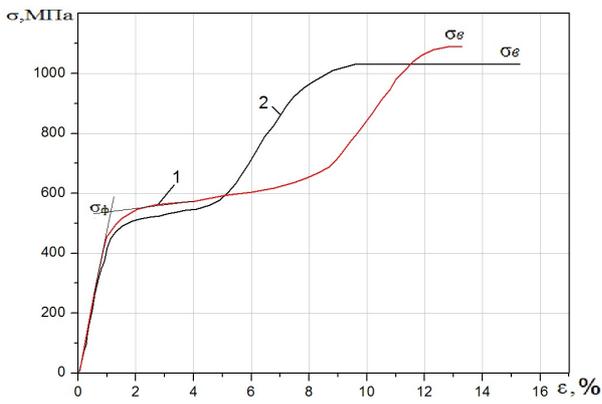


Рис.3. Диаграммы растяжения сплавов никелида титана в псевдоупругом состоянии: 1) TiNiCr; 2) Ti-50,68at%Ni

Видно, что пределы прочности (σ_{ϵ}) и фазовой текучести (σ_{ϕ}) сплава TiNiCr превышают значения указанных параметров сплава Ti-50,68at%Ni.

На рис.4 приведены кривые нагружения и разгрузки, обусловленные последовательным развитием мартенситных превращений.

В работе [5] показано, что если нагружение производить при температурах вблизи или выше A_f — окончания обратного мартенситного превращения, — то значительно повышается уровень напряжений, а разгрузка сопровождается замыканием гистерезисной петли. Из представленных кривых (рис.4) следует, что оба сплава обладают достаточно высокой обратимостью. Однако введение в сплав TiNi хрома приводит

к усилению движущих сил возврата псевдоупругой деформации при комнатной температуре. Разгрузка сплава TiNiCr сопровождается полным восстановлением псевдоупругой деформации (рис.4а). Поэтому сплавы TiNiCr преимущественно используются в медицине для изготовления катетеров. В сплавах Ti-50,68at%Ni приложенное напряжение меньше предела фазовой текучести (см. рис.3), поэтому движущие силы возврата изменяются во всем интервале заданной деформации. В результате происходит недовозврат псевдоупругой деформации при разгрузке и появление остаточной деформации. Гистерезисная петля сплава Ti-50,68at%Ni замыкается только на втором-третьем циклах (рис.4б). При этом обратимая сверхупругая деформация сплавов TiNiCr составляет $\epsilon_{rec} = 7\%$, в то время как у сплавов Ti-50,68at%Ni $\epsilon_{rec} = 5,5\%$.

Микрофрактографический анализ поверхности излома проволоочных образцов после многократного симметричного изгиба показал, что в сечении излома наблюдаются узкие и широкие деформационные микрополоски. В работе [5] такого рода микрополоски называются нагрузочными. Экспериментально установлено, что при больших деформациях нагружения ($\epsilon=6-7\%$) после усталостного разрушения в сечении излома образца выявляется одна широкая деформационная микрополоска (рис.5а). При меньших деформациях нагружения (4-5%) число нагрузочных микрополосок возрастает до двух, от узкой до широкой (рис.5б), а если $\epsilon \leq 3\%$, то образуется три микрополоски в направлении от поверхности образца к его центру (рис.5с).

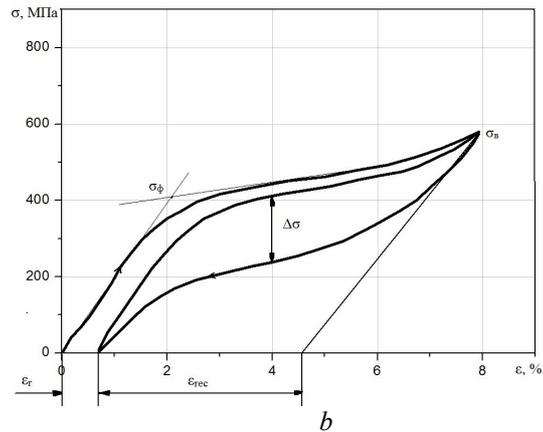
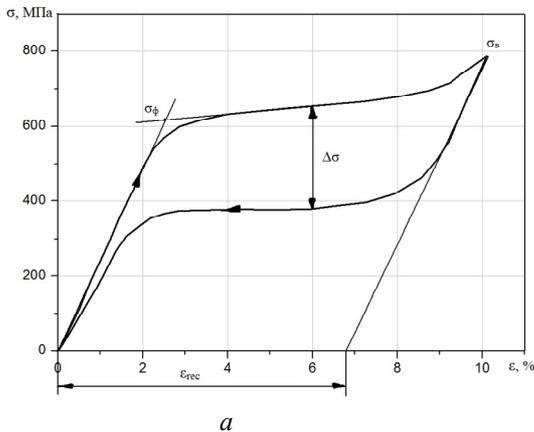


Рис.4. Диаграммы деформирования при реализации псевдоупругости сплавов TiNiCr (а) и Ti-50,68at%Ni (б). σ_{ϕ} — фазовый предел текучести; $\Delta\sigma$ — ширина механического гистерезиса; ϵ_{rec} — обратимая сверхупругая деформация; ϵ_r — остаточная деформация

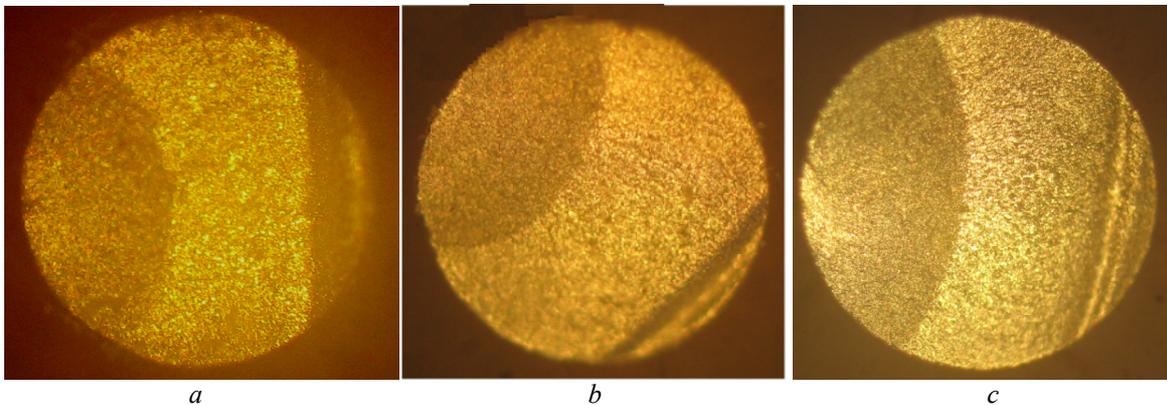


Рис.5. Деформационные микрополоски в сечении излома после циклического симметричного изгиба: а) $\epsilon = 6,6\%$, 317 ц.; б) $\epsilon = 4\%$, 1201 ц.; в) $\epsilon = 3\%$, 3499 ц. Увеличение $\times 160$

Усталостная повреждаемость, обусловленная эволюцией дислокационной структуры, сосредотачивается преимущественно в поверхностном слое. На микрофрактограммах излома выявляются устойчивые деформационные микрополоски, развивающиеся вследствие концентрации напряжений, поскольку повышенная плотность дислокаций облегчает появление микротрещин. Наличие неметаллических (рыхлых) включений в виде $Ti_3(NiCr)_4$ [4] в сплавах $TiNiCr$ и $Ti_4Ni_2O_x$ [2] в сплавах $Ti-50,68at\%Ni$, надо полагать, способствует зарождению усталостных трещин в области деформационных микрополосок.

Вполне вероятно, что в зоне усталости трещины формируются путем скачкообразного продвижения деформационных микрополосок (рис.6), как это схематически показано в работе [7]. Возрастающие напряжения в ослабленном сечении образца вызывают мгновенное разрушение. Эту стадию характеризует зона долома.

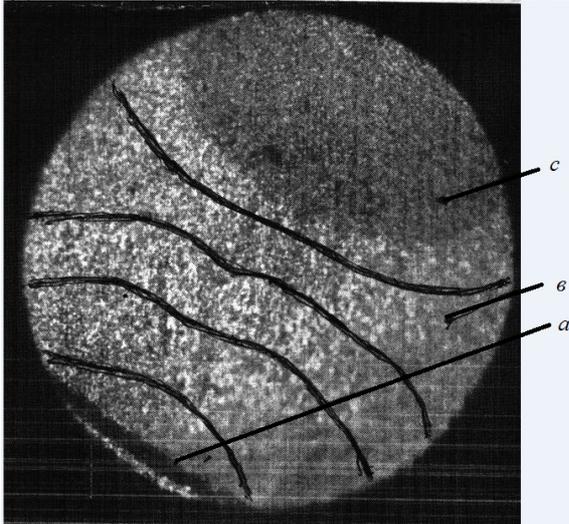


Рис.6. Поверхность излома образца: а — область зарождения микротрещин; в — зона усталости; с — зона долома

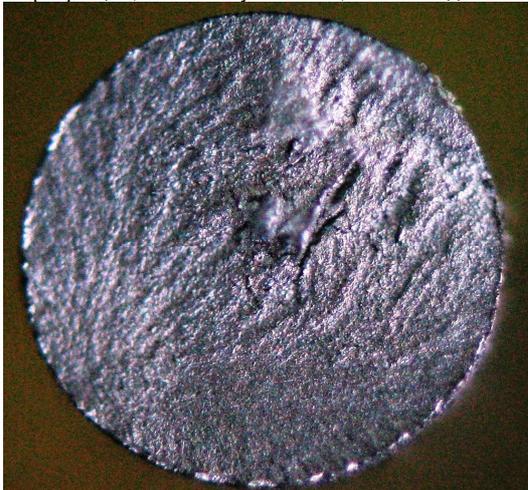


Рис.7. Общий вид охрупчивания поверхности образца при механическом циклировании по режиму изгиб с кручением. $\epsilon=5\%$, 94 цикла. Увеличение $\times 160$

Совершенно иной характер усталостного разрушения образцов по режиму одновременного изгиба с кручением. Характерно, что при больших и малых деформациях нагружения на краях сечения излома образуются фасетки скола. При больших деформациях нагружения ($\epsilon = 6-7\%$) наряду с мелкими сколами наблюдаются отдельные крупные. При меньших деформациях нагружения ($\epsilon \leq 3\%$) на краях сечения

излома образуется непрерывная цепочка мелких сколов. В результате при циклировании под нагрузкой происходит охрупчивание поверхностного слоя образца с нерегулярными, микроскопическими отколами (рис.7). Концентрация внутренних напряжений на краях сечения излома в процессе циклического нагружения способствует зарождению и развитию микротрещин, инициирующих разрушение.

Заключение

1. Изготовлены автоматизированные установки и разработана методика исследования циклической долговечности проволоочных образцов диаметром 1,0 мм из сплавов никелида титана с эффектом памяти формы в режимах симметричного изгиба и изгиба с кручением.

2. Микрофрактографическим исследованием установлен характер разрушения проволоочных образцов в зависимости от режима циклического нагружения:

- в режиме симметричного изгиба в сечении излома образцов основным дефектом, вызывающим разрушения являются деформационные микрополоски;
- в режиме изгиба с кручением очагом разрушения являются крупные и мелкие фасетки скола, развивающиеся на поверхности проволоочных образцов.

1. Лихачев В.А. и др. Материалы с эффектом памяти формы: Справочное издание. СПб, 1998. 267 с.
2. Журавлев В.Н., Пушин В.Г. Сплавы с термомеханической памятью и их применение в медицине. Екатеринбург, 2000. С.28-30, 149-151.
3. Патент на изобретение №2374356 от 27.11.2009 г. Способ термомеханической обработки изделий из сплава на основе никелида титана / В.А.Андреев, А.Б.Бондарев, М.А.Хусаинов, Б.Я.Тамбулатов.
4. Frotscher M., Burow J., Wagner M.F.-X., et al. Thermo-mechanical processing, microstructure and bending rotation fatigue of ultra-fine grained TiNiCr-wires // Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies (SMST-07). Japan, Tsukuba. Desember 2-5, 2007. Pp.149-157.
5. Wagner M., Sawagucht T., Kaustrater G. et al. Structural fatigue of pseudoelastic NiTi shape memory wires // Material Science & Engineering: A. 2004. V.378. P.105-109.
6. Лихачев В.А., Кузьмин С.П., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Л.: ЛГУ, 1987. С.150-152.
7. Материаловедение / Под. ред. Б.Н.Арзамасов. М.: Машиностроение, 1986. С.130.

References

1. Likhachev V.A. et al. Materialy s effektom pamiaty formy. Spravochnoe izdanie [Shape memory materials. Reference work]. Saint Petersburg, SPSU Publ., 1998. 268 p.
2. Zhuravlev V.N., Pushchin V.G. Splavy s termomekhanicheskoi pamiat'iu i ikh primenenie v meditsine [Thermal shape memory alloys and their application]. Ekaterinburg, 2000, pp. 28-30, 149-151.
3. Andreev V.A., Bondarev A.B., Khusainov M.A., Tambulatov B.Ia. Sposob termomekhanicheskoi obrabotki izdelii iz splava na osnove nikelida titana [Method of thermo-mechanical treatment of titanium-nickelide alloy products]. Patent RF, no. 2374356, 2009.
4. Frotscher M., Burow J., Wagner M.F.-X., Neuking K., Egger G., Schon P., Bockmann R.; Shuichui Miyazaki, ed. Thermo-mechanical processing, microstructure and bending rotation fatigue of ultra-fine grained TiNiCr-wires. Proc. of the Int. Conf. on Shape Memory and Superelastic Technologies (SMST-07). Japan, Tsukuba, 2007, pp. 149-157.
5. Wagner M., Sawagucht T., Kaustrater G., Hoffken D., Egger G. Structural fatigue of pseudoelastic NiTi shape memory wires. Materials Science Engineering A, 2004, vol. 378, pp. 105-109.
6. Likhachev V.A., Kuz'min S.L., Kamentseva Z.P. Effekt pamiaty formy [Shape memory effect]. Leningrad, LSU Publ., 1987, pp. 88-95.
7. Arzamasov B.N., ed. Materialovedenie [Material engineering]. Moscow, "Mashinostroenie" Publ., 1986, p. 130