

Дюшекеев К.Д., Чымырбаев А.Б., Чоробек К.А.

## РЕАКТИВНОЕ УСИЛИЕ ПРОВОЛОКИ ИЗ НИКЕЛИДА ТИТАНА ПРИ АКТИВНОМ НАГРУЖЕНИИ

УДК: 539.371

В работе [1] приведены результаты экспериментального изучения генерации реактивного усилия нитиноловой проволоки в случае накопления фазовой деформации при изотермическом нагружении в мартенситном состоянии. Показано, что величина реактивного усилия в значительной степени зависит от длины рабочего участка проволоки.

В данной работе авторы попытались экспериментально определить влияние длины рабочего участка проволоки из никелида титана на величину генерируемого проволокой реактивного усилия в обоих способах получения фазовой деформации.

### Методика эксперимента

Экспериментальный образец представляет собой проволоку диаметра 1 мм, изготовленную из никелида титана (53,8 Ti-46,2 Ni вес.%) с общей длиной 420 мм.

Характеристические температуры фазовых превращений образца были следующие: температуры начала и конца прямого мартенситного превращения  $M_n = 550\text{C}$ ,  $M_k = 270\text{C}$ , температуры начала и конца обратного превращения  $A_n = 650\text{C}$ ,  $A_k = 800\text{C}$ . Предел фазовой текучести в мартенситном состоянии, т.е. уровень напряжения, выше которого в образце могут появиться остаточные фазовые деформации, при растяжении равен 80 МПа. Модуль упругости материала образца в мартенситном состоянии, измеренный на рабочем участке длиной 80 мм, равен  $E_M = 0,12 \cdot 10^5$  МПа, а в аустенитном состоянии –  $E_A = 0,49 \cdot 10^5$  МПа [2]. Для снятия внутренних остаточных напряжений образец перед каждым испытанием подвергается отжигу при температуре 500 °С в течение одного часа в специальной колодке, затем колодка вынимается из печи и охлаждается в течение 15 минут. После чего образец без колодки охлаждается до комнатной температуры (15 °С) в воздухе.

Экспериментальная установка представляет собой приспособление, монтированное на растягивающей машине Р-5 (рис.1). Образец (проволока) 1 закрепляется верхними 2 и нижними 6 зажимами с помощью болтов 3 к неподвижному 4 и подвижному 8 суппортам. Для уменьшения трения между подвижным суппортом 8 и направляющим 10 установлены подшипники 9. Растяжение проволоки осуществляется подвешиванием грузов 7 к грузодержателю. Удлинение проволоки измеряется индикатором часового типа 5, шток которого упирается к штанге подвижного суппорта 8. При измерении реактивного усилия проволоки вместо грузов закрепляется динамометр на растяжение, а нагрев образца осуществляется пропусканием тока напряжением около 80 В. Температура образцов измеряется хромель-алюмелевой термопарой.

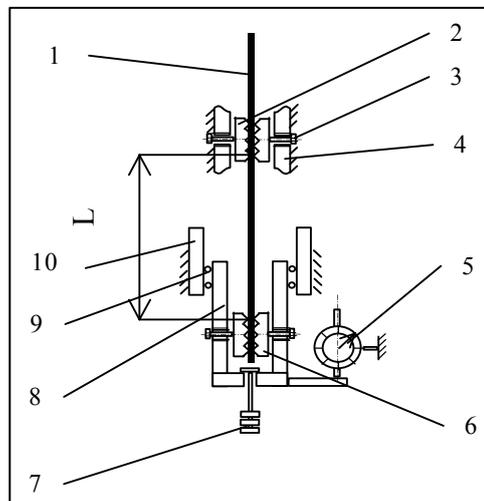


Рис.1. Схема экспериментальной установки

### Эксперименты проводились по следующим программам.

Согласно первой программе проволока с определенной длиной рабочего участка  $L$  изотермически в мартенситном состоянии растягивается нагрузкой до заданной величины  $R_{max}$ . Производится полная разгрузка. Затем к нижнему концу проволоки присоединяется динамометр и образец нагревается до конца температуры обратного фазового превращения.

В соответствии со второй программой экспериментов проволока в аустенитном состоянии нагружается напряжением, меньшим предела фазовой текучести в мартенситном состоянии ( $\sigma_c$ ). Затем она охлаждается под этой нагрузкой до температур, ниже конца прямого мартенситного превращения и производится полная разгрузка. Далее к нижнему концу проволоки присоединяется динамометр и образец нагревается до конца температуры обратного фазового превращения.

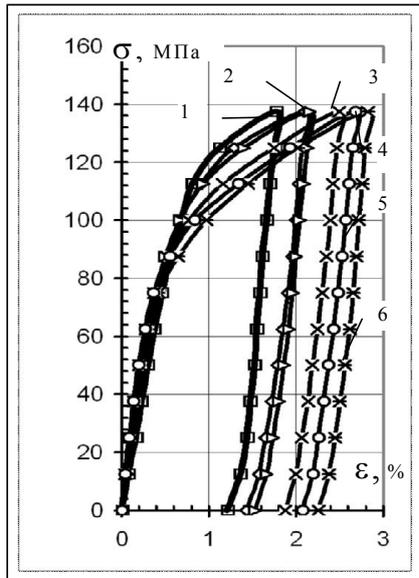


Рис.2. Диаграмма растяжения проволоки

В процессе эксперимента измеряются значения нагрузки, удлинения и реактивного усилия.

**Результаты и обсуждение**

Реализация программ экспериментов проводилась при различных 12 рабочих длинах (80, 100,... 300 мм). Изотермическое нагружение в мартенситном состоянии производилось для пяти максимальных значений нагрузки (112.5, 118.7, 125, 131.2 и 137.5 МПа). Типичная диаграмма растяжения (при 137,5 МПа) для шести значений рабочей длины показана на рис.2. Здесь кривая 1 соответствует рабочей длине проволоки  $L = 80$  мм, 2 – 120, 3 – 160, 4 – 200, 5 – 240, 6 – 280 мм.

Видно, что с ростом длины рабочего участка при постоянном значении максимальной нагрузки увеличиваются значения модуля упругости, деформации перед разгрузкой и остаточной деформации. Зависимость модуля упругости проволоки от длины ее рабочего участка показана на рис.3. Он меняется от 1.104 МПа при длине 80 мм до

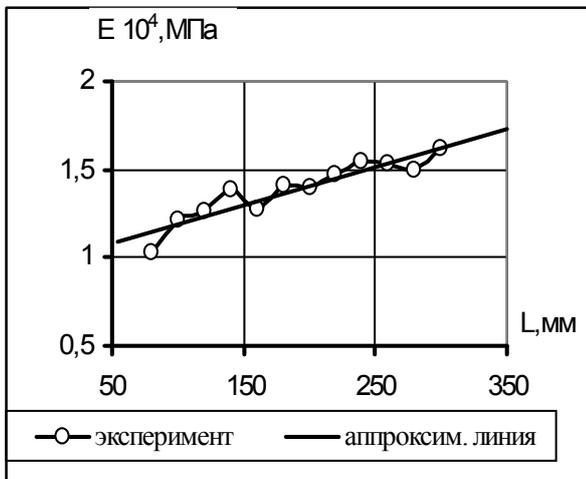


Рис.3. Изменение модуля упругости

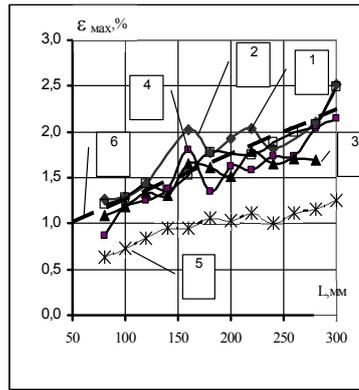


Рис.4. Зависимость максимальной деформации от длины рабочего участка проволоки

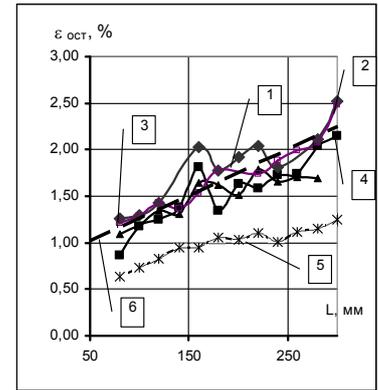


Рис.5. Зависимость остаточной деформации от длины рабочего участка проволоки

1,6 · 10<sup>4</sup> МПа при длине 280 мм. Как видно из рисунка эту зависимость можно считать линейной.

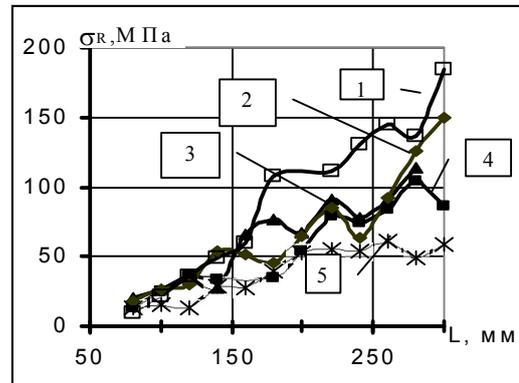


Рис.6. Зависимость реактивного напряжения от длины рабочего участка проволоки

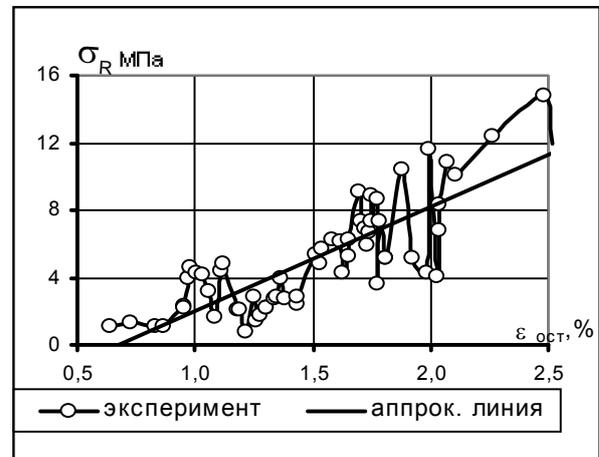


Рис.7. Зависимость реактивного напряжения от величины остаточной деформации

Влияние длины рабочего участка проволоки на значения максимально накопленной и остаточной деформации показано на рис.4 и 5. На этих рисунках кривая 1 соответствует значению напряжения перед разгрузкой, равному 137,5 МПа, кривая 2 – 131.2, кривая 3 – 125, кривая 4 – 118.7, кривая 5 – 112.5 МПа. Цифрой 6 обозначена аппроксимирующая линия для кривой 1. За исключением некоторых точек эти кривые близки к прямой, например для кривой 1 при аппроксимации линией 6 среднее квадратичное отклонение составляет 0,91. Из рисунков видно, что при увеличении длины рабочего

участка в 3,7 раза остаточная и максимально накопленная деформация увеличиваются приблизительно в 2 раза. А также из приведенных графиков можно сделать заключение, что закон разгрузки прямолинейный и параллелен упругому участку нагружения.

При стесненном нагреве образца после разгрузки вследствие проявления эффекта памяти формы он начинает генерировать реактивное усилие. Известно, что значение реактивного усилия изменяется пропорционально величине остаточной деформации [2]. Поскольку остаточная деформация увеличивается с увеличением длины рабочего участка проволоки, то при этом генерированное напряжение тоже увеличивается (рис.6 и 7). Здесь кривая 1 соответствует максимальному напряжению 137,5 МПа, кривые 2 – 131,2, 3 – 125, 4 – 117,8 и 5 – 112,5 МПа. Видно, что полученные кривые можно с большим приближением аппроксимировать прямыми линиями. При такой аппроксимации получим, что величина генерированного напряжения зависит от длины рабочего участка для различного уровня максимального напряжения по разному (рис.8). Т.е. чем больше уровень напряжения перед разгрузкой, тем больше значение генерируемого реактивного напряжения при одинаковой длине рабочего участка

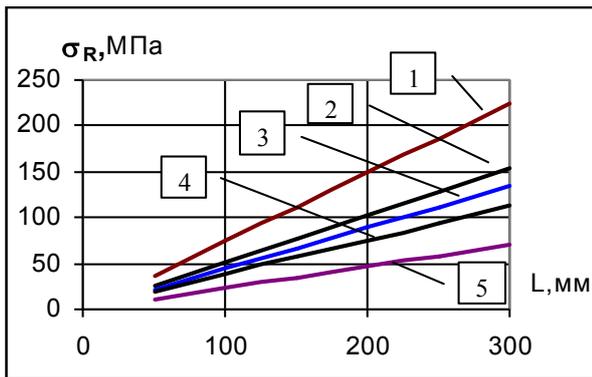


Рис.8. Линеаризованная зависимость реактивного напряжения от длины рабочего участка проволоки

проволоки. При увеличении максимального напряжения от 112,5 до 137,5 МПа, т.е. на 22%, значение реактивного напряжения увеличивается для длины 300 мм от 70 до 224 МПа, т.е. на 220%.

Таким образом, можно сделать вывод, что длина рабочего участка проволоки из никелида титана пропорционально влияет на величины накапливаемой деформации, остаточной деформации и генерируемого реактивного напряжения. А также с увеличением длины рабочего участка проволоки увеличивается значения модуля упругости в мартенситном состоянии. Вторая программа экспериментов, т.е. накопление фазовой деформации при прямом мартенситном превращении осуществлялась под тремя начальными напряжениями: 75; 62,5 и 50 МПа (рис.9). Как видно из рис.10, в этом случае не наблюдается зависимость величины фазовой деформации от длины рабочего участка проволоки. Как и следовало ожидать [2], чем больше значение начальной

нагрузки, тем больше накапливается (остаточная) фазовая деформация.

Несмотря на то, что при атермическом случае накопления фазовой деформации величина остаточной деформации не зависит от длины рабочего участка проволоки, значение реактивного усилия зависит от этой длины (рис.11). Т.е., значение реактивного усилия увеличивается приблизительно в

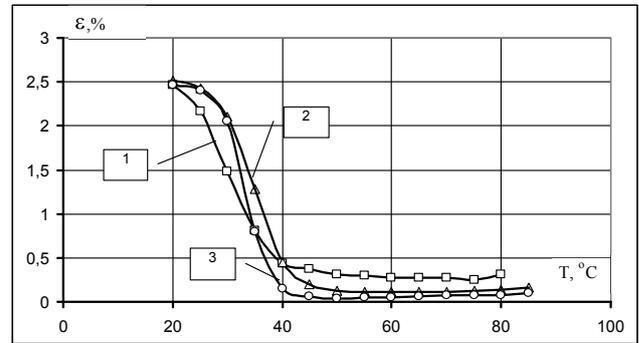


Рис.9. Накопление фазовой деформации при прямом мартенситном превращении  
1 – при длине рабочего участка 100 мм, 2 – при 160 мм, 3 – при 220 мм.

три раза при увеличении длины рабочего участка в 3,7 раза почти прямопропорционально. Такое же изменение реактивного усилия наблюдалось и в изотермическом нагружении (рис.6).

Такое поведение титано-никелевой проволоки,

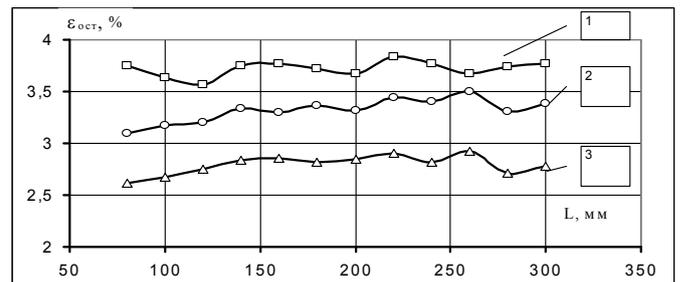


Рис.10. Зависимость значения остаточной деформации от длины рабочего участка проволоки.  
Кривая 1 – при начальной нагрузке 75 МПа, кривая 2 – при 62,5, кривая 3 – при 50 МПа

видимо, связано с неоднородностью свойств рассматриваемой проволоки по ее длине. Во всяком случае пока отсутствует какие-либо обоснованные объяснения и требуются дополнительные экспериментальные исследования.

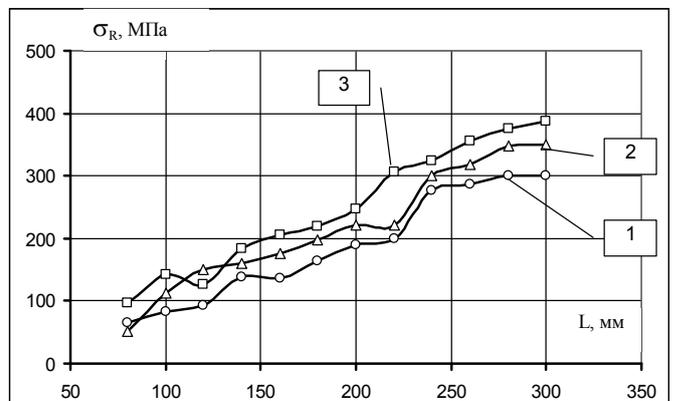


Рис.11. Зависимость реактивного усилия от длины рабочего участка проволоки.  
Кривая 1 – при начальном напряжении 75 МПа, кривая 2 – при 62,5 МПа, кривая 3 – при 50 МПа

**Литература:**

1. Дюшекеев К.Д., Чымырбаев А.Б. Реактивное усилие титано-никелевой проволоки // XLIV Международная конференция "Актуальные проблемы прочности", 3-7 октября 2005 г. – Вологда, 2005. – С.172.

2. Абдрахманов С.А., Дюшекеев К.Д. О закономерностях поведения материалов с памятью формы при термосиловом воздействии. – Б.: Изд-во "Илим", 1992. -50 с.

3. Абдрахманов С.А., Дюшекеев К.Д. Деформация материала с эффектом памяти формы в интервале мартенситных превращений // Проблемы прочности. – 1992.-№12. -С. 57-62.