

Псевдоупругость сплава Ti–Ni при действии всестороннего давления

© С.А. Егоров, И.Н. Лобачев

Санкт-Петербургский государственный университет,
Научно-исследовательский институт математики и механики им. В.И. Смирнова,
198904 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 19 апреля 1999 г.)

Обнаружено, что в сплаве Ti–Ni действие всестороннего давления на эффект сверхупругости при некоторых условиях подобно действию деформирующей силы, а при некоторых условиях такое подобие не наблюдается.

Известно, что в материалах с термоупругими мартенситными превращениями изменением всестороннего давления можно стимулировать различные деформационные и силовые явления [1–3], такие как эффекты пластичности превращения, памяти формы, обратимой памяти формы при нагревании и охлаждении, генерации и релаксации реактивных напряжений. Однако неизученным оставалось влияние давления на явление сверхупругости (сверхэластичности). В то же время разрешение этого вопроса актуально, поскольку связано с более полным пониманием явлений мартенситной неупругости вообще и сверхупругости, в частности. Поэтому целью настоящих исследований было изучение механического поведения сплавов с термоупругими мартенситными превращениями при наложении давления во время реализации эффекта сверхупругости на примере сплава Ti–Ni.

Для проведения исследований использовали камеру высокого давления, схема которой представлена на рис. 1. Консольный образец 1 рабочей длиной 15 мм и диаметром 1.8 мм нагружали стальной пружиной [2]. Перемещение верхнего ее конца регулировали с помощью винта 3 с шагом резьбы 0.5 мм, а перемещение ее нижнего конца, равное прогибу свободного края образца 1, определяли с помощью ползункового реостата 4, подключенного к цифровому омметру 5. Зная эти два перемещения, можно было легко вычислить силу воздействия пружины 2 на образец 1. Описанное устройство позволяло осуществлять нагружение до 100 Н и разгрузку образца независимо от действующего давления, уровень которого мог варьироваться от атмосферного до 240 МПа. В качестве рабочей жидкости использовали машинное масло. Результаты тестирования реостата 5 и пружины 3 показали, что погрешности определения силы F и перемещения свободного края образца f равны соответственно 2 Н и 0.06 мм. Нагревая корпус камеры высокого давления печкой 6, можно было варьировать температуру внутри нее от комнатной до 360 К.

Все опыты проводили при температуре 335–337 К, которая достигалась прогревом камеры в течение 3 ч. Тепловая инертность установки (масса последней вместе с рабочей жидкостью была 80 кг) позволяла обеспечивать неизменность температуры образца в пределах 1 К на протяжении всего времени проведения эксперимента.

В качестве объекта исследований выбрали сплав $Ti_{44.2}Ni_{54.4}Co_{0.52}Cr_{0.43}$. После изготовления и каждого опыта образцы отжигали при 750 К в течение 40 min, охлаждали с печью до 290 К и далее до температуры жидкого азота.

Тестовые термомеханические эксперименты на кручение при атмосферном давлении показали, что охлаждение и нагревание под постоянным сдвиговым напряжением 60 МПа сопровождаются эффектами пластичности превращения и памяти формы с участием промежуточной фазы (видимо, R -фазы [4]). Характеристические температуры равны $M_s = 345$ К, $M_f = 265$ К, $A_s = 303$ К, $A_f = 416$ К.

В рамках настоящего исследования проведены три серии экспериментов. Первые эксперименты по изучению влияния всестороннего давления на псевдоупругое поведение сплава Ti–Ni выполняли следующим образом. После установки образца в камеру высокого давления и достижения температуры 335–337 К при атмосферном давлении его нагружали силой P , наблюдая деформирование. Достигнув определенного значения P , увеличивали давление p до 200 МПа со скоростью 6 МПа/min. По мере увеличения давления происходило постепенное накопление деформации в сторону приложенной силы, так что величина прогиба f увеличивалась на 0.2–0.4 мм. После достижения $p = 200$ МПа продолжали нагружение, наблюдая накопление деформации.

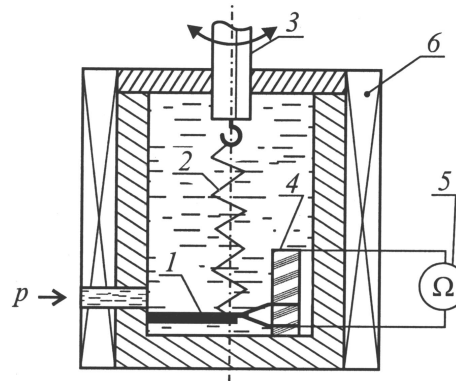


Рис. 1. Схема камеры высокого давления: 1 — образец, 2 — упругая пружина, 3 — измерительный винт, 4 — ползунковый реостат, 5 — омметр, 6 — печка.

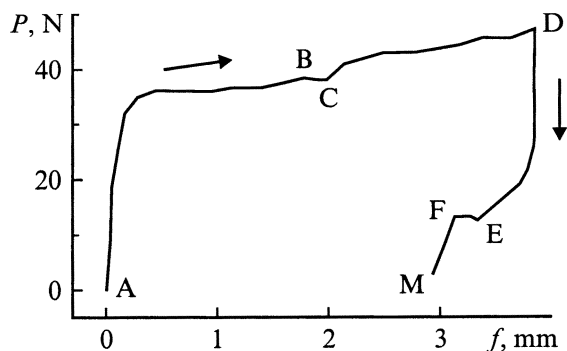


Рис. 2. Зависимость силы деформирования от величины прогиба при постоянном атмосферном давлении (участки AB и FM), увеличении давления от атмосферного до 200 МПа (участок BC), постоянном давлении 200 МПа (участок CDE), уменьшении давления с 200 МПа до атмосферного (участок EF).

При достижении величины прогиба $f = 4-7$ мм образец разгружали до некоторого значения P и постепенно уменьшали давление до атмосферного. Оказалось, что уменьшение давления сопровождалось дополнительным уменьшением величины f на 0.2–0.4 мм с приблизительно линейной ее зависимостью от p . Дальнейшая разгрузка приводила к обычному для данного случая механическому поведению образца. Одна из полученных кривых показана на рис. 2, где участки AB , BC , CD , DE , EF и FM соответствуют этапам эксперимента. Из рисунка видно наличие эффектов, которые заключаются в том, что увеличение давления на этапе нагружения сопровождается накоплением деформации (участок BC), а уменьшение давления на этапе разгрузки приводит к дополнительному деформационному возврату (участок EF). Важно отметить, что эти баромеханические эффекты не наблюдаются в случае, если изменение давления производить на упругих участках зависимости $f(P)$. Сказанное относится как к этапу увеличения нагрузки, так и к этапу ее уменьшения.

В следующих экспериментах образец устанавливали в рабочую камеру при 290 К, поднимали давление до 200 МПа, нагревали до 335–337 К, производили нагружение до некоторого значения P и уменьшали давление с 200 МПа до атмосферного. Было обнаружено, что уменьшение давления сопровождалось сильным разупрочнением материала (требуемая для деформирования сила уменьшалась на 5–15 Н, т.е. на 15–50%) и деформированием в сторону приложенной нагрузки на $f = 0.5-1$ мм. Величина f линейно зависела от величины изменения давления. Дальнейшее нагружение образца при атмосферном давлении сопровождалось его деформированием. Сказанное иллюстрируется на рис. 3, *a*, где участки AB , BC , CD относятся к описанным стадиям механического поведения Ti-Ni на этапе нагружения.

В следующих опытах при атмосферном давлении и температуре 337 К образец деформировали на $f = 5$ мм, разгружали и при некотором значении P увеличивали

давление до 200 МПа. На рис. 3, *b*, который относится к этому случаю, видно, что увеличение давления приводило к накоплению деформации, и величина f , соответствующая участку BC , увеличивалась на 0.2–0.4 мм (зависимость $f(p)$ была линейной). Иными словами, увеличение давления в данном случае стимулировало реверс деформации относительно направления формоизменения, наблюдавшегося до изменения барических условий (отметим, что увеличение давления на упругом участке разгрузки деформированием не сопровождалось). Дальнейшее уменьшение P под давлением 200 МПа приводило к обычному псевдоупругому возврату.

Полученные данные позволяют предположить, что бароциклирование по схеме увеличение давления–уменьшение давления, произведенное на этапе нагружения, должно сопровождаться деформированием образца во время каждого цикла. Чтобы проверить это, произвели последнюю серию опытов. При температуре 336 К и атмосферном давлении образец неупруго деформировали и при достигнутом значении P увеличивали давление до 200 МПа, а затем уменьшали его до атмосферного. В результате на каждом этапе бароциклирования материал накапливал деформацию так, как это показано на рис. 4, *a*. Здесь участки BC и CD относятся соответственно к этапам увеличения и уменьшения давления. Таким образом, высказанные выше предположения оказались правильными.

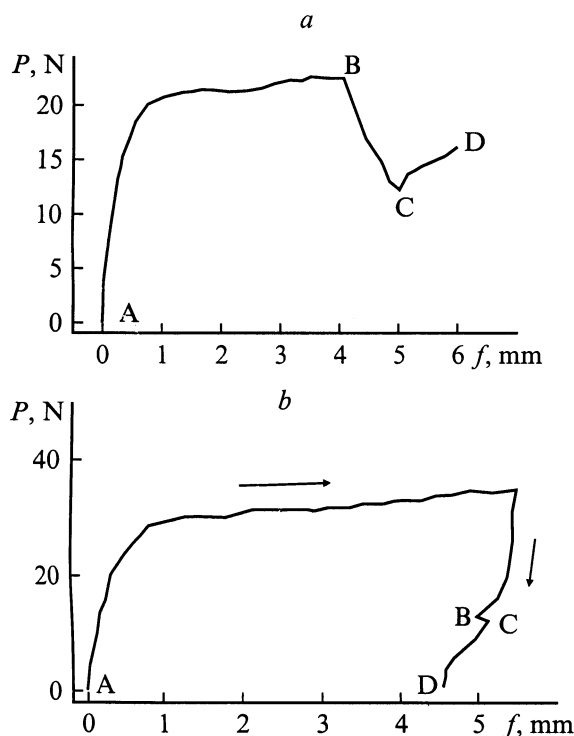


Рис. 3. Кривые $P(f)$ при различных режимах воздействия давления: *a*: AB — постоянное давление 200 МПа, BC — уменьшение давления с 200 МПа до атмосферного, CD — постоянное атмосферное давление; *b*: AB — постоянное атмосферное давление, BC — увеличение давления от атмосферного до 200 МПа, CD — постоянное давление 200 МПа.

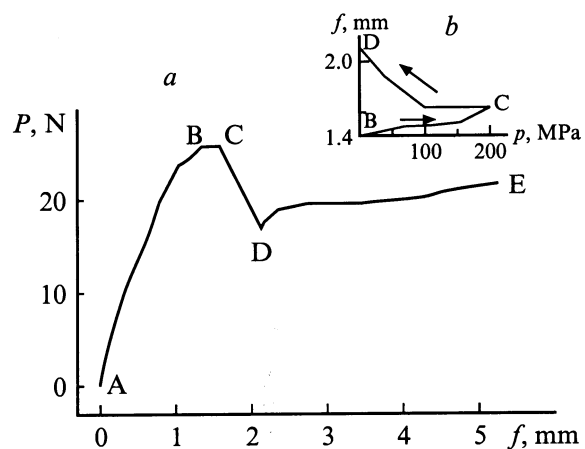


Рис. 4. Зависимости деформирующей силы от величины прогиба при различных режимах действия давления (*a*) и величины прогиба от давления при его изменении (*b*). Учаски *AB* и *DE* — постоянное атмосферное давление, *BC* — увеличение давления от атмосферного до 200 МПа, *CD* — уменьшение давления от 200 МПа до атмосферного.

Анализ полученных результатов показывает, что и увеличение, и уменьшение давления как на этапе нагружения, так и при разгрузке сопровождается деформированием изучаемого материала. Однако характер этого формоизменения различается в зависимости от того, на каком этапе изменяется давление, и от того, в какую сторону это изменение происходит. Причины такого нетривиального баромеханического поведения материала пока полностью неясны. Возможно, изменение давления в зависимости от своего направления инициирует различные превращения. Например, поскольку в изучаемом сплаве прямая и обратная мартенситные реакции происходят с участием промежуточной R -фазы, то в случае противоположных знаков для объемных эффектов превращений $B2 \leftrightarrow R$ и $R \leftrightarrow B19'$ изменение давления в одну сторону может стимулировать один переход, а его изменение в другую сторону — другой (в соответствии с уравнением Клаузиуса–Клапейрона). В пользу сказанного указывает сравнение рис. 3, *a* и рис. 4, *b*. Во втором случае видно, что уменьшение давления, производимое сразу после его увеличения с атмосферного до 200 МПа, инициирует деформирование начиная лишь со 100 МПа, а в опытах, результаты которых даны на рис. 3, *a*, зависимость $f(P)$ оказывается приблизительно линейной.

В то же время пока неясна природа эффекта размягчения материала вследствие увеличения давления на этапе разгрузки (рис. 3, *b*). В самом деле, если на этапе нагружения уменьшение давления стимулирует некоторый прямой фазовый переход (например, $B2 \leftrightarrow R$ или $R \leftrightarrow B19'$), в результате чего наблюдается сильное размягчение материала (рис. 3, *a*), то на этапе разгрузки следовало бы ожидать, что увеличение давления будет стимулировать соответствующее обратное превращение и упрочнение сплава. В опыте этого не наблюдается, а

происходит размягчение материала. Это указывает на то, что влияние давления на сверхупругое поведение материала нельзя считать полностью подобным действию деформирующей силы. В дальнейшем авторы намерены подробнее изучить этот вопрос.

Подводя итог, сделаем следующие выводы.

1. В изученном сплаве Ti–Ni на этапе нагружения увеличением давления можно инициировать накопленные деформации, а на этапе разгрузки уменьшением давления — псевдоупругий возврат. В данных случаях действие давления на сверхупругое поведение сплава аналогично действию деформирующей силы.

2. На этапе псевдоупругого накопления деформации уменьшение давления, а на этапе псевдоупругого возврата его увеличение сопровождаются резупрочнением изучаемого материала.

3. Обнаруженные закономерности свидетельствуют, что действие всестороннего давления на эффект сверхупругости в Ti–Ni нельзя считать полностью подобным действию деформирующей силы.

Авторы весьма признательны за постоянные консультации А.Е. Волкову.

Работа выполнена при поддержке Научной школы академика В.В. Новожилова.

Список литературы

- [1] Беляев С.П., Егоров С.А., Лихачев В.А., Ольховик О.Е. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 11. С. 36–46.
- [2] Лихачев В.А., Беляев С.П., Егоров С.А. // Современные вопросы физики и механики материалов. Матер. XXXII семинара "Актуальные проблемы прочности". СПб., 1997. С. 171–177.
- [3] Беляев С.П., Егоров С.А., Лобачев И.Н. // Матер. I Международного семинара "Актуальные проблемы прочности". им. В.А. Лихачева и XXXIII семинара "Актуальные проблемы прочности". Т. 2. Ч. 1. Новгород, 1997. С. 60–67.
- [4] Хачин В.Н., Пуцин В.Г., Кондратьев В.В. Никелид титана: структура и свойства. М.: Наука, 1992. 160 с.