

М.А.Хусаинов, В.А.Андреев, Н.В.Малых, А.Б.Бондарев

ПСЕВДОУПРУГОСТЬ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СКОРОСТЯХ НАГРУЖЕНИЯ

The structure of investigated alloy after deformation is shown to be unstable, because pseudoelastic form recovery of form is noticed after the removal of active force. The connection between the diagram of straining of pseudoelastic alloy of the given structure and possible variants of realization of pseudoelasticity effect is fixed according to force and deformative characteristics.

Известно [1,2], что металлы и сплавы с мартенситными превращениями способны восстанавливать большие деформации при снятии внешней нагрузки в изотермических условиях. Такое явление было названо псевдоупругостью. В большинстве случаев псевдоупругость проявляется, когда деформирование осуществляется в аустените, ниже температуры M_d . Это значит, что псевдоупругость связана с характеристическими температурами мартенситных превращений. Практически всегда псевдоупругость сильно выражена в области температуры A_f и связана с механическими свойствами. Повышение механических свойств может быть вызвано увеличением скорости деформирования, что повлечет за собой изменение эффекта псевдоупругости. Однако этот вопрос недостаточно освещен в научной литературе. В данной работе исследуется явление высокотемпературной псевдоупругости при различных скоростях деформирования.

Опыты проводились на сплаве Ti-50,6 ат.%Ni после горячего деформирования с подстуживанием. Температуры мартенситных превращений после этой операции следующие: $M_f = -52^\circ\text{C}$, $M_s = -43^\circ\text{C}$, $T_R = -22^\circ\text{C}$, $A_s = -38^\circ\text{C}$, $A_f = -8^\circ\text{C}$. Деформирование образцов осуществлялось на разрывной машине FPZ-1.0. Все испытания проводились при комнатной температуре. Скорость нагружения V изменялась в пределах от 0,8 до 40 мм/мин.

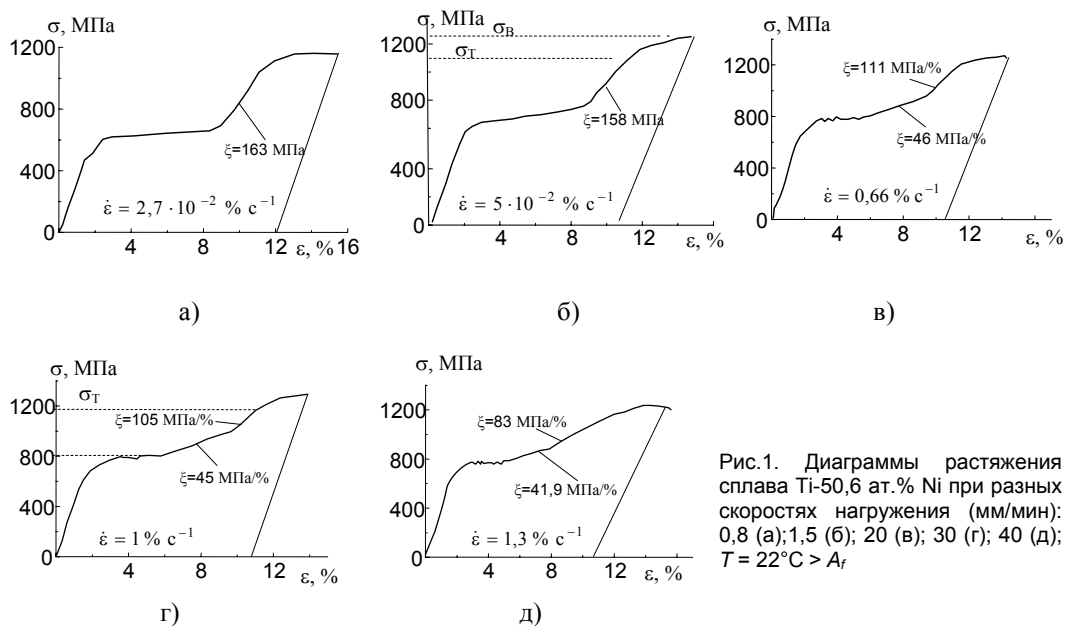


Рис.1. Диаграммы растяжения сплава Ti-50,6 ат.% Ni при разных скоростях нагружения (мм/мин): 0,8 (а); 1,5 (б); 20 (в); 30 (г); 40 (д); $T = 22^\circ\text{C} > A_f$

На рис.1 приведены диаграммы растяжения исследуемого сплава. Видно, что при скоростях растяжения 0,8 и 1,5 мм/мин наблюдаются типичные для псевдоупругих сплавов диаграммы. Обе диаграммы практически одинаковы как по значениям механических свойств, так и по длине платообразного участка фазовой текучести. Диаграммы деформи-

рования при более высоких скоростях заметно отличаются. На всех платообразных участках диаграмм появляется «зубчатость» (рис.1в, г, д). Такое поведение, по-видимому, связано с тем, что при малых скоростях деформирования фазовая текучесть, как правило, обусловлена мартенситным превращением, а при более высоких скоростях нагружения зубчатость, вызванная скачками напряжений, свидетельствует о возникновении упругих двойников. Упрочнение на участке фазовой текучести отсутствует. При увеличении деформации наблюдаются две стадии деформационного упрочнения.

На первой стадии медленно нарастающее напряжение свидетельствует о фазово-упрочняющем течении. Интенсивность упрочнения невысока. Прямым доказательством этого являются низкие значения деформационного упрочнения ($41 \div 46$ МПа/%). При переходе от первой стадии ко второй коэффициент деформационного упрочнения ξ возрастает. Здесь двойниковый и мартенситный каналы неупругости по данным [2] завершают свое развитие. Вполне очевидно, что при значительных напряжениях на второй стадии преобладает механизм дислокационного упрочнения, обусловленного возникновением плоских скоплений дислокаций, задерживающих движение межфазных границ. Эти события приводят к стабилизации структуры сплава и исчезновению движущих сил возврата. Вследствие этого на этапе разгрузки, как правило, фиксируется недовозврат упругой деформации. Обращает на себя внимание то, что степень деформационного упрочнения сплава заметно выше при низких скоростях деформирования, чем при высоких. Например, при $\dot{\epsilon} = 1,3\% \text{с}^{-1}$ ($V = 40$ мм/мин) коэффициент деформационного упрочнения $\xi = 83$ МПа/%, а при $\dot{\epsilon} = 2,7 \cdot 10^{-2} \% \text{с}^{-1}$ ($V = 0,8$ мм/мин) $\xi = 163$ МПа/%. По-видимому, существует тесная связь между увеличением скорости деформации и температурой. Наши измерения, в частности, показали, что деформация со скоростью $0,66\% \text{с}^{-1}$ повышает температуру на $10\text{--}12^\circ\text{C}$. Изменение температуры может привести к снижению критического напряжения сдвига и уменьшению в связи с этим коэффициента деформационного упрочнения. Однако, как показали опыты, значение предела текучести сплава при скоростях деформации $> 0,6\% \text{с}^{-1}$ выше, чем при низких ($\leq 5 \cdot 10^{-2} \% \text{с}^{-1}$). Вероятно, это связано с увеличением силы сопротивления решетки сдвигу.

В работе [3] отмечается, что в металлах с ОЦК структурой сопротивление скольжению на высоких скоростях деформации связано с внутренним трением при движении дислокаций. Таким образом, силы механического происхождения при затрудненном движении доменных и двойниковых границ оказываются недостаточными, чтобы вызвать псевдоупругое восстановление формы. Поэтому разгрузка на второй стадии деформационного упрочнения не приводит к полному псевдоупругому возврату. На малых скоростях нагружения остаточная деформация составляет около 1%, тогда как при более высоких скоростях не превышает 0,25%. В то же время из диаграмм напряжение — деформация (рис.2) следует, что псевдоупругость усиливается на больших базах деформации. При этом наиболее выраженный характер псевдоупругого возврата имеет место на меньших скоростях деформирования (рис.2а).

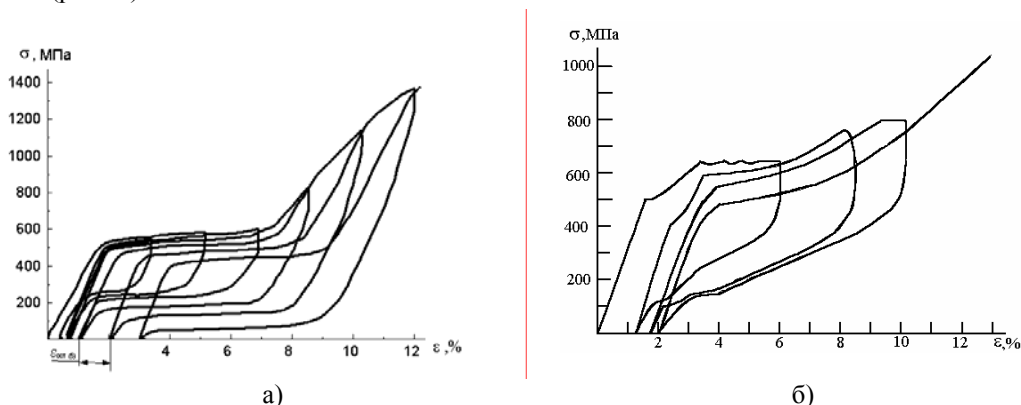


Рис.2. Диаграммы деформирования сплава Ti-50,6 ат. % Ni; $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-2} \% \text{с}^{-1}$ (а) и $\dot{\epsilon} = 1 \% \text{с}^{-1}$ (б)

Псевдоупругое поведение исследуемого сплава состоит в том, что мартенсит, по выражению В.А.Лихачева [2], обладает исключительной склонностью к двойникованию. Поэтому в мартенсите всегда существуют группы двойников, которые испытывают тенденцию к перестроению в аустенит при удалении внешней нагрузки. В результате возможно полное восстановление формы. Однако если разгрузка происходит на второй стадии деформационного упрочнения, где проявляется механизм дислокационного скольжения, то всегда имеет место остаточная деформация (рис.2). Вместе с тем следует обратить внимание на то, что в большинстве случаев после первого цикла нагружения и разгрузки наблюдается частичный возврат формы. На последующих циклах если деформация не превышает протяженности платообразного участка, то петли псевдоупругого гистерезиса замыкаются, и процесс стабилизируется. Рис.3 дает полное представление о псевдоупругом возврате при

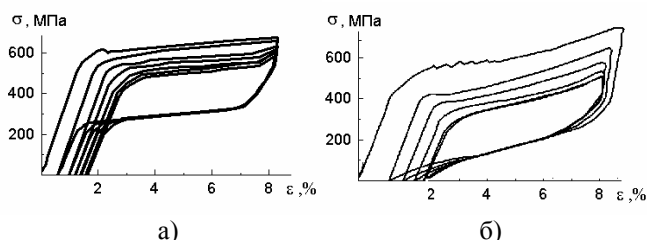


Рис.3. Диаграммы деформирования сплава Ti-50,6 ат.% Ni при $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-2} \% \text{с}^{-1}$ (а) и $\dot{\epsilon} = 0,66 \% \text{с}^{-1}$ (б); $T = 22^\circ \text{C}$

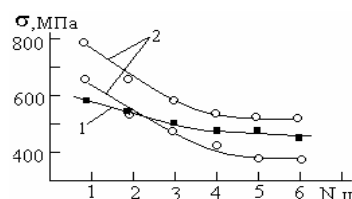


Рис.4. Изменение фазового предела текучести при механическом циклировании при $\dot{\epsilon} = 5 \cdot 10^{-2} \% \text{с}^{-1}$ (1) и $\dot{\epsilon} = 0,66 \% \text{с}^{-1}$ (2)

низкой и высокой скоростях нагружения. Флажковую форму псевдоупругости демонстрируют сплавы при деформировании на малых скоростях $(2 \div 5) \cdot 10^{-2} \% \text{с}^{-1}$. Общим для такого типа диаграмм является то, что фазовый предел текучести снижается до момента стабилизации эффекта псевдоупругости на 4-6 циклах. На больших скоростях деформации изменение фазового предела текучести σ^{Φ} более заметно (рис.4, кривые 2). Повышение σ^{Φ} при увеличении скорости нагружения приводит к росту деформирующих напряжений и, как следствие, к увеличению движущих сил псевдоупругого возврата. Опыты показали, что с повышением скорости деформирования псевдоупругость усиливается. В то же время форма петли существенно изменяется. Выраженная флажковая форма, наблюдаемая при низких скоростях деформации (рис.3а), не выявляется при высоких (рис.3б).

Анализ диаграмм показывает, что кинетика формоизменения петель псевдоупругого гистерезиса при повторении механических циклов нагружение — разгрузка примерно одинаковая, поскольку после 4-6 циклов процесс стабилизируется и многократно повторяется при последующем продолжении циклирования. Однако скорость деформации оказывает заметное влияние на форму кривых псевдоупругости.

Выводы

1. Показано, что наведенная деформацией структура исследуемого сплава оказывает неустойчивой, поскольку после удаления действующей силы наблюдается псевдоупругое восстановление формы.
2. Установлена взаимосвязь между диаграммой растяжения псевдоупругого сплава заданного состава и возможными вариантами реализации эффекта псевдоупругости по силовым и деформационным характеристикам.
3. Механическое циклирование сплава приводит к снижению фазового предела текучести и к стабилизации петли псевдоупругого гистерезиса, как правило, после 4-6 циклов независимо от скорости деформирования.

1. Эффект памяти формы в сплавах / Пер. с англ. Под ред. В.А.Займовского. М., 1979. 472 с.
2. Лихачев В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. Эффект памяти формы. Л.: ЛГУ, 1987. С.88-118.
3. Мак-Лин Д. / Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1965. С.154-158.