

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Андреев В. А.*, Хусаннов М. А., Волнянская О. Ю., Малых Н. В.

**Промышленный центр «МАТЭК», Москва
Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого
vestnik@novsu.ac.ru*

Термическая и пластическая обработки, как правило, существенно изменяют структуру металла и, как следствие, механические свойства. При этом существенную роль играет термомеханический фактор – способность сплавов с памятью формы к обратимому формоизменению [1,2]. Это является одним из важнейших условий работы активных элементов многократного действия. Стабильность срабатывания проектируемых устройств с использованием сплавов с эффектом памяти формы (ЭПФ) зависит также от состава сплава и структурного состояния продуктов мартенситного превращения. Например, пластическая деформация мартенсита уменьшает размер ячеек. В результате возникает весьма развитая тонкая структура, повышающая обратимый эффект памяти формы [3]. В тоже время активная деформация аустенита инициирует отрицательный эффект [4].

В данной работе изучалось влияние наиболее характерных видов ТМО на температуры мартенситных превращений (МП), величину обратимой памяти формы ($\epsilon_{\text{тпф}}$), уровень генерируемых реактивных напряжений и стабильность структуры, определяемую по температуре срабатывания при термодиклировании в неполном интервале МП, во взаимосвязи с упругим контртелом. Исследования проводились на сплавах TiNi двух составов Ti – 50,2 ат. % Ni и Ti – 50 ат. % Ni. Первый сплав был поставлен в виде листа толщиной 1,1 мм, второй в виде прутка $\varnothing 20$. Образцы вырезались на электроискровом станке, шлифовались в целях удаления микротрещин и подвергались последующей обработке. Затем исследуемые образцы из сплава Ti – 50,2 ат. % Ni закаливались в воде с $T = 900^\circ \text{C}$, $\tau = 15$ мин и отжигались при 500°C , 30 мин., а образцы из сплава Ti – 50 ат. % Ni только отжигались при 500°C , 30 мин. Такие режимы принимались за исходное состояние. Температуры МП сплавов исходного состояния следующие: Ti – 50,2 ат. % Ni: $M_s = 14^\circ \text{C}$, $M_f = (-7)^\circ \text{C}$, $A_s = 32^\circ \text{C}$, $A_f = 40^\circ \text{C}$; Ti – 50,0 ат. % Ni: $M_s = 54^\circ \text{C}$, $M_f = 47^\circ \text{C}$, $A_s = 84^\circ \text{C}$, $A_f = 95^\circ \text{C}$. Термомеханическая обработка заключалась в деформировании сплавов на двухвалковом стане по режимам: а) прокатка в холодную при $T < M_s$ на $\epsilon = 10\%$; б) прокатка при $T < M_s$ с промежуточными отжигами на $\epsilon = 30\%$ и последующим обжатием ($\epsilon = 10\%$). После пластического деформирования (прокатки) все образцы подвергались отжигу при различных температурах в течение 1,5 ч.

Влияние температуры отжига на критические точки МП показаны на рис. 1. Из сопоставления с таблицей следует, что отжиг сплавов при 300°C вызывает заметное понижение температур МП, по сравнению с исходным состоянием. Нагрев до 350°C сплава обогащенного никелем приводит к росту температур M_s , T_R и A_f при неизменных значениях M_f и A_s . Тогда как у сплавов эквиатомного состава, наоборот, M_f и A_s снижа-

ются, а такие, как M_s и A_f , остаются на прежнем уровне. После отжига при 420°C наблюдается закономерное возрастание критических температур M_f и A_s , в то время как M_s и A_f не меняются. Дальнейшее повышение температуры отжига до 480°C приводит к изменению всех параметров гистерезиса МП. Является характерным то, что если характеристические температуры сплава, обогащённого никелем, резко снижаются, то сплавов эквивалентного состава резко растут. Такое различие в поведении сплавов, надо полагать, обусловлено влиянием процессов старения, протекающих при отжиге деформированных металлов.

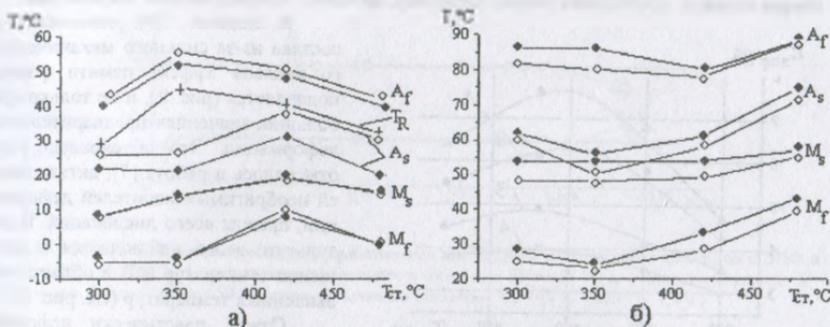


Рис.1. Влияние температуры старения ($T_{ст}$) на температуры МП Ti – 50,5 ат. % Ni (а) и Ti – 50,0 ат. % Ni (б). Светлые кружки – после прокатки «входную» (10 %); темные – после прокатки «входную» (30 %) с промежуточными отжигами и последующего обжатия (10 %)

В частности, в сплавах, склонных к старению (Ti – 50,2 ат. % Ni), образуются мелкодисперсные выделения вторых фаз Ni_3Ti , Ni_4Ti_3 [5]. Это с одной стороны, а с другой – в этих сплавах образуется мартенситная R-фаза. Тогда как в сплавах эквивалентного состава она отсутствует. Наличие промежуточной R-фазы, как правило, способствует высокой обратимости деформации при более низких температурах мартенситного перехода. В сплавах эквивалентного состава переход из неупорядоченного состояния в упорядоченное (ОЦК-решётку) более затруднен вследствие возникновения несовершенств, препятствующих мартенситному превращению. В этом случае для реализации МП требуются большие затраты тепловой энергии. Это демонстрируют и полученные данные (рис. 1,б), свидетельствующие о повышении температур МП с увеличением температуры отжига. Здесь следует обратить внимание на то, что пластическое деформирование (30 %) с промежуточными отжигами на точки МП исследуемых сплавов не оказывает существенного влияния, по сравнению с единичной деформацией (прокаткой) на 10 %. Вполне вероятно, что обжатие на 10 % «входную» после прокатки (30 %) нивелирует эффект формирования поля ориентированных микронапряжений, созданного на этапе 30 % обжатия. Однако если учесть, что после снятия нагрузки ориентированные микронапряжения не исчезают, то можно ожидать положительного влияния на другие характеристики сплавов, например, на память формы, как будет показано ниже.

Способность сплавов испытывать формоизменение только по каналам обратимой деформации оценивали по коэффициенту степени возврата деформации при отогреве $k = \varepsilon_{нф} / \varepsilon_{пр}$, где $\varepsilon_{пр}$ – предварительная деформация (рис. 2). Представленные кривые показывают, что с повышением температуры отжига величина эффекта памяти формы

вначале возрастает, достигая максимального значения при 420° С, затем снижается. Такой характер изменения ЭПФ проявляется на обоих сплавах независимо от вида термомеханической обработки. Следует отметить то, что пластическое деформирование (30 %) с промежуточными отжигами способствует обратимому формозменению. Об этом можно судить по восстанавливающейся деформации ($\epsilon_{\text{эф}}$). ЭПФ после прокатки с промежуточными отжигами, как правило, возрастает. Этот эффект связывают с релаксацией ориентированных микронапряжений механического происхождения, созданных в процессе пластического деформирования. В результате нагрева сплавов, прошедших такую обработку, вызывает полный возврат деформации.

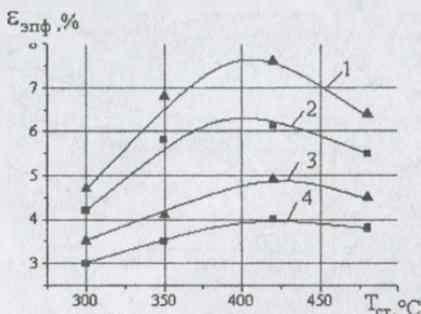


Рис. 2. Зависимость величины обратной памяти формы от температуры отжига сплавов Ti-50,2 ат. % Ni (1,2) и Ti-50,0 ат. % Ni (3,4). 1,3 – после деформации «вхолостую» (30 %) с промежуточными отжигами и последующего обжатия ($\epsilon = 10\%$); 2,4 – после деформации только «вхолостую» (10 %).

% Ni исходного состояния $\sigma^{\phi} = 12 \text{ кг/мм}^2$, дислокационный предел $\sigma_{\tau} = 57 \text{ кг/мм}^2$, предел прочности $\sigma_{\sigma} = 91 \text{ кг/мм}^2$, то после холодной прокатки (10 %) и отжига при 420° С эти величины соответствуют $\sigma^{\phi} = 15 \text{ кг/мм}^2$, $\sigma_{\tau} = 80 \text{ кг/мм}^2$, $\sigma_{\sigma} = 110 \text{ кг/мм}^2$, а после деформации (30 %) с промежуточными отжигами с последующим обжатием (10 %) и отжига 420° С: $\sigma^{\phi} = 14 \text{ кг/мм}^2$, $\sigma_{\tau} = 90 \text{ кг/мм}^2$, $\sigma_{\sigma} = 120 \text{ кг/мм}^2$ МП.

Данный результат представляется чрезвычайно важным с практической точки зрения, поскольку, используя тот или иной вид термомеханической обработки сплава, можно стабилизировать структуру аустенита и обеспечить устойчивую работу мартенситных приводов, особенно в условиях действия многократных теплосмен. Эффективность стабилизации структуры сплавов оценивалась на образцах испытывающих сотни, тысячи и миллионы термических циклов (нагрев \leftrightarrow охлаждение) в неполном интервале МП. Такие условия реализовывались на активных элементах из сплавов с ЭПФ, прошедших ТМО, которые устанавливались в действующие макеты, термореле и подвергались термоциклированию в интервале заданных температур, при противодействии упругого контртела. Обычно режим работы таких устройств на первых 6-18 циклах неустойчивый, так как температуры срабатывания при нагреве и охлаждении изменяются и устанавливаются на определенном уровне лишь после нескольких циклов [7]. Наиболее эффективно стабилизирует структуру сплавов ТМО режим, в который входит прокатка «вхолостую» с промежуточными отжигами. Если отжиг в этой операции снимает наклеп, то пластическая деформация не менее 30% формирует поле ориентированных микронапряжений, которое обеспечивает направленность прямого и обратного мартен-

В сплавах TiNi эквиатомного состава из-за сильного механического наклепа эффект памяти формы подавляется (рис. 2), и не только при больших значениях предварительной деформации. Это обусловлено, как отмечалось в работе [7], активизацией необратимых носителей деформации, прежде всего дислокаций. В результате этого наблюдается и смещение температур МП в область повышенных температур (см. рис. 1).

Отжиг пластически деформированных сплавов влияет и на механические свойства. Анализ полученных результатов показывает, что прокатка с промежуточными отжигами всегда способствует повышению прочностных характеристик сплава. В частности, если фазовый предел текучести сплава Ti-50,2 ат.

ситных переходов. Последующий незначительный наклеп (10 %) способствует увеличению возвращаемой деформации. Это связывается с возрастанием σ_t , которое приводит к возможности деформирования сплава исключительно по каналам фазовой и двойниковой пластичности [8]. Повышение способности к восстановлению формы после отжига в течение 1,5 ч при 420° С состоит в уменьшении разоросширенности зёрен за счёт снятия внутренних напряжений, созданных на предыдущем этапе деформирования (10%). Это обстоятельство приводит к стабилизации структуры сплава. Прямым доказательством сказанному свидетельствуют результаты испытаний, приведённые на рис. 3.

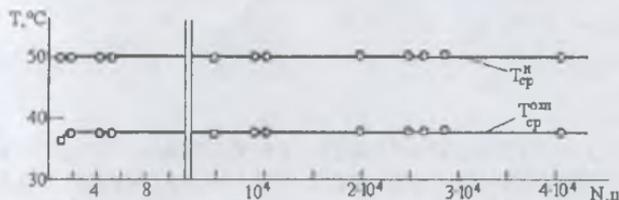


Рис.3. Эффект стабилизации температур срабатывания при нагреве и охлаждении элементов с ЭПФ из сплава Ti – 50, 2 ат.% Ni при термоциклировании в интервале 50 ↔ 38 °С и жесткости контртела $K = 0,37$ кг/мм. После ТМО ($\varepsilon = 30\%$ с промежуточными отжигами + $\varepsilon = 10\% + 420^\circ\text{C}$, 1,5 ч.)

Хорошо видно, что неустойчивая стадия отсутствует. При этом температурный интервал $T_{сп}^н - T_{сп}^ок = \Delta T$, в котором функционирует рабочий элемент с ЭПФ оказывается достаточно узким ($\Delta T = 12^\circ\text{C}$). Данный результат касается стареющего сплава (Ti – 50,2 ат. % Ni).

Для сплава TiNi эквиатомного состава указанный режим ТМО не является благоприятным. Однако протяжённость неустойчивой стадии этих сплавов всё же уменьшается с 8 ÷ 10 до 2–3 циклов.

Выводы

1. Выявлены закономерности изменения температур МП после старения в интервале (300 + 480)° С. Показано различие в кинетике развития МП в никелиде титана с добавками никеля и эквиатомного состава после ТМО.
2. ТМО оказывает существенное влияние на функциональные свойства исследуемых сплавов. Это обстоятельство позволяет управлять структурой и свойствами, а также использовать найденные режимы обработки в практических целях.
3. Установлен оптимальный вариант ТМО, стабилизирующий структуру сплава обогащённого никелем.

Список литературы

1. Прокошкин С.Д., Капуткина Л.М., Хмелевская И.Ю. и др. / Сб. материалы с эффектом памяти формы и их применения. Часть 1, Новгород – Ленинград, 1989, с. 48–50.
2. Хмелевская И.Ю., Лагунова М.И., Прокошкин С.Д., Капуткина Л.М. / Сб. материалы со сложными функционально-механическими свойствами. Новгород, 1994, с. 121–125.
3. Хусайнов М.А., Андреев В.А., Бречко Т., Волнянская О.Ю. / Научные труды VI Международного симпозиума «Современные проблемы прочности». Старая Русса, 20–24.10.03., том 2, 2003, с. 301–303.

4. Хмелевская И.Ю., Лагунова М.И., Прокошкин С.Д., Капуткина Л.М. / Научные труды семинара «Актуальные проблемы прочности» им. В.А. Лихачёва, том 2, часть 2, 1997, с. 356-361.
5. Пушин В.Г., Кондратьев В.В., Хачин В.Н. / Известия ВУЗов «Физика», №5, 1985, с. 292-304.
6. Хусаинов М.А., Зайцев В.А., Андреев А.В. / Сб. металлы с эффектом памяти формы и их применение. Новгород – Ленинград, 1989, с. 117-121.
7. M.A. Khusainov, O.Yu. Volnyanskaya / Journal de Physique IV Proceedings. ICOMAT'02. International Conference on Martensitic Transformations, part 2, France, 2002, p. 781-784.
8. Лихачёв В.А., Кузьмин С.Л., Каменцева З.П. / Эффект памяти формы. Л., ЛГУ, 1987, с. 134-147.

УДК 677.017

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕТЕРОГЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кузнецов А. А., Иваненков Д. А.

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Беларусь
iwanenkow@tut.by

Одинокое волокно (нить), как практически любую продукцию текстильной промышленности, необходимо рассматривать как сложную техническую систему вследствие многообразия и многосвязности отношений между их компонентами, сложности поведения под действием разнообразных воздействий внешних факторов и условий окружающей среды. Известно, что исследования практически любых технических систем осуществляется на основе применения двух типов математических моделей: аналитических и имитационных [1]. В данной работе в качестве метода исследования использовано имитационное моделирование процессов испытания.

Имитационное моделирование в общем случае представляет собой численный метод проведения на ЭВМ экспериментов с математическими моделями, которые описывают поведение компонентов изделия (системы) в течение заданного или формируемого периода времени. Поведение компонентов системы и их взаимодействие в имитационной модели чаще всего описывается определенным набором алгоритмов, реализуемых на выбранном языке моделирования.

Для описания кривых растяжения в координатах «напряжение σ – относительное удлинение ϵ » предлагается универсальная математическая модель, следующего вида:

$$\sigma = \frac{\epsilon}{b_0 + b_1 \cdot \epsilon} + b_2 \cdot \epsilon^2, \quad (1)$$

где σ – напряжение, возникающее при растяжении волокна (нити), Па; ϵ – относительное удлинение, %, b_0, b_1, b_2 – некоторые параметры модели.

При разработке имитационной модели полциклового испытания на растяжение одиночной нити (волокна) была выдвинута гипотеза, предполагающая, что объект исследования можно представить структурно в виде m последовательно соединенных участков (элементов) длиной ΔL_i . При этом каждый i -й участок нити имеет не только