

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

УДК 621.78

ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СПЛАВОВ  
НА ОСНОВЕ ТИТАНА И НИКЕЛЯ© 2020 г. Г. Н. Полякова<sup>1,\*</sup>, У. Х. Угурчиев<sup>2,\*\*</sup>, Н. Н. Новикова<sup>2,\*\*\*</sup><sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

\*e-mail: polyakovagn@bmstu.ru

\*\*e-mail: umar77@bk.ru

\*\*\*e-mail: natalnn3@mail.ru

Поступила в редакцию 22.02.2019 г.

Принята к публикации 25.10.2019 г.

В статье представлены особенности термомеханической обработки при температурах выше 400°C сплавов на основе Ti и Ni, обладающими эффектом памяти формы, рассмотрены свойства материалов с термоупругими превращениями в зависимости от термического и термомеханического воздействия, а также особенности термической обработки сплавов с термоупругими превращениями. Предложены технологии применения термообработки для деталей из сплава с эффектом памяти формы в зависимости от предварительной обработки и вида заготовки (полуфабрикатов).

*Ключевые слова:* термомеханическая обработка, эффект памяти формы, мартенситное превращение

**DOI:** 10.31857/S0235711920010113

Целью термической обработки является повышение механических свойств металла. Термическая обработка является конечной операцией технологического процесса при переработке материалов для обеспечения необходимых физико-механических и эксплуатационных характеристик для сплава заготовки.

Сплавы на основе титана и никеля обладают термоупругими мартенситными превращениями, такими как эффектом памяти формы и сверхупругостью [1].

В зависимости от условий эксплуатации, проявляемые эффекты способны выполнять “целенаправленную работу”. Сгруппируем применение таких материалов по условиям их использования: *в условиях технологического применения* — эффект памяти формы в деталях из сплавов за пределами температур эксплуатации; *в эксплуатационных условиях* — эффект памяти формы в деталях из сплавов при рабочих температурах; *в условиях изменения параметров эксплуатации* (температур, напряжений или их сочетаний), приводящих к эффекту памяти формы [2].

При использовании материала в определенных условиях, необходимо применять сплав, у которого критические точки мартенситных превращений будут соответствовать эффекту памяти формы, сверхупругости или комбинации этих эффектов. Например, генерируемые *внутренние* напряжения (напряжения термомеханического возврата) в сплаве при фазовых превращениях устанавливаются исходя из условия однократного или многократного использования эффекта памяти формы и/или сверхупругости.

Для получения физико-механических характеристик, при которых проявляется эффект памяти применяется термическая и термомеханическая обработка материалов.

Из-за особенностей сплава титан-никель можно выделить типовые **группы термомеханической обработки**:

1. На **эффект памяти формы** – формирование, закрепление вида и конфигурации заготовки, которую должна иметь готовая деталь в процессе ее эксплуатации. Структура материала приобретает стабильное расположение кристаллов при температурах выше 400°C. Например, при изготовлении пружины из проволоки. Если конфигурация заготовок совпадает с формой полуфабриката и проходит пластическая деформация материала в процессе производства полуфабрикатов, то при таких температурах термическая обработка на память формы не проводится. Например, для прессованных и горячекатаных прутков, труб, листов и т.п., которые имеют память прямолинейной формы.

2. На **получение “односторонней памяти”**. Эффект памяти формы может проявляться за пределами температур эксплуатации, при этом деталь принудительно деформируется в охлажденном состоянии и восстанавливает свои первоначальные размеры при нагреве.

3. На **обратимое изменение формы**. Эффект заключается в “самопроизвольной” деформации материала при прямом превращении (при охлаждении) и при обратном (нагреве) – восстановление исходной формы. Данный эффект проявляется многократно при циклах охлаждение-нагрев. Это явление, в соответствии с современной терминологией, принято обозначать как ОЭПФ или ОЭЗФ. Самопроизвольная деформация при охлаждении обусловлена наличием мартенситного сдвига в необходимом направлении. Наведение мартенситного сдвига инициируется изменением температур в области мартенситного превращения с приложением внешних воздействий на материал в аустенитном или мартенситном состоянии, а также при термоциклировании за счет фазового наклепа. Величина наведенного мартенситного сдвига и его стабильность зависят от очередности и видов мартенситного превращения, происходящих в материале. Высокий предел прочности ( $\sigma_b$ ) и текучести ( $\sigma_t$ ) аустенитной фазы и напряжений термомеханического возврата ( $\sigma_R$ ) при восстановлении деформации мартенситной неупругости наблюдается при формировании субструктуры ячеистого типа с повышенной плотностью дефектов в предварительно упрочненных сплавах. Упрочнение материала осуществляется методами деформационного и фазового наклепа, а также дисперсионного твердения. После термической обработки при температурах 500–600°C генерируемые реактивные напряжения повышаются примерно в 2.5 раза, что приводит к восстановлению первоначальной формы.

4. На **формирование двустороннего эффекта памяти формы (ДЭПФ)**. Деталь при охлаждении самопроизвольно деформируется в одном, затем в противоположных направлениях, а при нагреве та же деформация осуществляется в обратном порядке [3].

5. На **корректировку температур мартенситного превращения в малых пределах**. Корректировку температур мартенситного превращения в малых пределах можно осуществлять за счет изменения соотношений компонентов в матрице TiNi, растворяя или коагулируя интерметаллиды ( $Ti_2Ni$  или  $TiNi_3$ ) из сплава титан-никель, которые прецизионно корректируют соотношение компонентов в матрице TiNi. Интервалы мартенситного превращения, температуры деформации детали в области мартенситной неупругости и восстановление этой деформации при нагреве зависят от свойств матрицы.

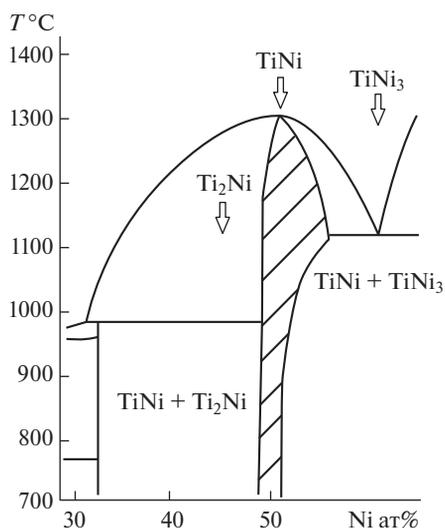
Зависимости температур фазового превращения сплава нитинола от атомарного состава Ti и Ni представлены в табл. 1, в которой приводятся характеристические температуры фазового превращения сплавов на основе соединения титан–никель (нитинол) с добавками железа, обладающего Эффектом памяти формы в зависимости от атомарного содержания в сплаве Ti и Ni и включения Fe.

**Таблица 1.**

Состав нитинола в процентном соотношении Ti и Ni, % (ат.)			Температура, °C			
Ti	Ni	включение Fe	$M_s$ – температура начала мартенситного превращения	$M_f$ – температура конца мартенситного превращения	$A_s$ – температура начала аустенитного превращения	$A_f$ – температура конца аустенитного превращения
52.8	47.2	—	90	60	100	135
50.0	50.0	—	50	20	55	75
49.5	50.5	—	25	5	35	60
49.25	50.75	—	0	–20	10	30
49.0	51.0	—	–55	–90	–50	–25
50.0	47.0	3.0	–90	–160	–72	–60

На рис. 1 представлена часть диаграммы равновесия системы TiNi, в интервале температур 700–1400°C.

Область гомогенности соединения TiNi довольно узкая и при температурах ниже 700°C не превышает 3%. При более высоких температурах (800–1000°C) растворимость значительно повышается, что позволяет иметь расплав с повышенным содержанием компонентов. При резком охлаждении (закалке), излишки растворенных компонентов выделяются в виде фаз Ti<sub>2</sub>Ni или TiNi<sub>3</sub>, в зависимости от обогащения компонента, стабилизируя состав матрицы. Отклонение соотношения компонентов титан-никель от расчетного на 0.1% в матрице приводит к изменению температур мартенситного превращения примерно на 15°C. Меняя, при соответствующих режимах закалки и “старения”, количества вторичных фаз (Ti<sub>2</sub>Ni и TiNi<sub>3</sub>), удается с большой точностью регулировать состав матрицы, и, следовательно, устанавливать требуемые



**Рис. 1.** Диаграмма состояния сплавов на основе титана и никеля. Заштрихованная область – область существования TiNi.

температуры мартенситного превращения. Сплавы с содержанием Ni более 50.5% (или дополнительно легированных Fe, Cu, Co) нагреваются до 800°C с последующим “старением” при 400–500°C [6], что является эффективным способом плавного регулирования температур мартенситных превращений в пределах 10–50°C, связанных с процессами выделения при закалке и обратного растворения вторичных фаз при “старении” [4].

**6. Повышения термомеханических характеристик.** Для конкретной партии материала физико-механические и термомеханические характеристики являются определяющими. Если интервалы температур мартенситного превращения  $M_s$ – $M_f$  по техническим условиям поставки и результаты контроля, соответствуют необходимым температурам эксплуатации деталей, то для снятия внутренних напряжений осуществляют термическую обработку [5].

**Методика технологии применения термомеханической обработки сплавов на основе титана и никеля.** При изготовлении эллипсовидного кольца из листовой заготовки в статье предложены и использованы технологические приемы, которые позволяют инициировать память формы для детали, отличающейся по форме от полуфабриката. Для этого прямолинейная заготовка при температуре ниже температуры конца мартенситного превращения  $M_f$ -деформируется и устанавливается в специальное приспособление и жестко фиксируется. В процессе термической обработки, при нагреве выше температуры начала аустенитного превращения  $A_s$ , заготовка стремится принять прямолинейную форму, но она заневолена специальным приспособлением, что препятствует процессу восстановления первоначальной формы и происходит пластическая деформация. Чтобы зафиксировать форму детали температуру нагрева необходимо поддерживать в пределах 450–500°C в течение 20–30 мин. Специальное приспособление для фиксации должно быть достаточно жестким, чтобы воспринимать генерируемые напряжения термомеханического возврата, возникающие в материале заготовки и не допускать каких-либо перемещений.

Внутренние напряжения, получаемые в процессе производства, при температурах ниже 400°C влияющие на линейные размеры полуфабрикатов.

При изготовлении деталей из холоднокатаных листов необходимо стабилизировать внутренние напряжения. Холоднокатаные листы способны “разбухать” в пределах 4%, а прутки и проволока укорачиваться или удлиняться в зависимости от вида деформации. Для этого используется термическая обработка. Процесс формирования заданной формы состоит из деформации материала в мартенситном состоянии, жестком его фиксировании, нагреве в заневоленном состоянии до температур 450–500°C, охлаждении до нормальных температур и освобождения от приспособления. При такой температуре время выдержки определяется соотношением: 10 мин/1 мм максимального сечения заготовки.

Нагрев заготовок для деталей, конфигурация которых формируется механической обработкой по всем поверхностям детали, можно производить в открытой печи. При этом припуск под обработку детали должен составлять не менее 0.5 мм. Для деталей, у которых некоторые поверхности после термической обработки не подвергаются механической обработке, нагрев осуществляется в атмосфере в соответствии с требованиями, предъявляемыми к титановым сплавам (вакуум или аргон).

**Выводы.** Термомеханическая обработка для сплавов на основе Ti и Ni с эффектом памяти формы имеет ряд особенностей по сравнению с другими материалами. Для того, чтобы получить деталь с заданной формой и требуемыми характеристиками необходимо детально изучить особенности термомеханической обработки. В статье были предложены виды термомеханической обработки сплавов на основе Ti и Ni, их особенности и условия работы. Предложены технологии применения термообработки для деталей из сплава с эффектом памяти формы в зависимости от предварительной обработки и вида заготовки (полуфабрикатов).

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хасьянов У., Угурчиев У.* Ультразвуковой контроль термомеханических характеристик заготовок из TiNi. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. № 4. С. 104.
2. *Лихачев В.А., Петрова Н.Н.* Структурный механизм накопления деформации при мартенситном превращении в TiNi // Ленинград: Издательство ФТИ им. Иоффе, 1984. С. 11.
3. *Ryklina E., Korotitskiy A., Khmelevskaya I., Soutorine M., Chernov A.* Control of phase transformations and microstructure for optimum realization of one-way and two-way shape memory effects in removable surgical clips // *Materials and Design*. 2017. V. 136. P. 174.
4. *Хасьянова Д.У.* Технологическое обеспечение качества изготовления муфт ТМС и сборки трубопроводов. Диссертация на соиск. уч. степ. канд. наук. МГУПИ, Москва. 2012. С. 103.
5. *Poletika T.M., Girsova S.L., Lotkov A.I., Krukovskii K.V.* The Evolution of the Microstructure and System of Ti<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub> Particles upon Heat Treatments of a Ti–50.9at%Ni Nanocrystalline Alloy // *Technical Physics*. 2019. V. 64. Issue 4. P. 490.