

Санкт-Петербургский государственный университет

АНИСИМОВА Дарина Михайловна

Выпускная квалификационная работа

Влияние внутренних источников тепла на деформационное поведение сплавов с памятью формы

Уровень образования: бакалавр

Направление 01.01.03 “Механика и математическое моделирование”

Основная образовательная программа СВ.5008.2019 “Механика и математическое моделирование”

Профиль “Механика твердого деформируемого тела”

Научный руководитель: доцент, к.ф-м.н. Евард М.Е.

Рецензент: доцент, к.ф-м.н. Беляев Ф.С.

Санкт-Петербург

2023

SAINT-PETERSBURG STATE UNIVERSITY

ANISIMOVA Darina

Bachelor's Thesis

Influence of internal heat sources on deformation behaviour of shape memory alloys

Level of education: bachelor

Area 01.01.03 “Mechanics and mathematical modeling”

Main educational program CB.5008.2019 “Mechanics and mathematical modeling”

Profile “Mechanics of deformable solid body”

Scientific supervisor: As. Prof., Dr. M.E. Evard

Reviewer: As. Prof., Dr. F.S. Belyaev

Saint Petersburg

2023

Оглавление

Введение.....	4
1. Основные понятия.....	5
1.1. О материалах с памятью формы.....	5
1.3. Тепловые процессы в материалах с памятью формы.....	8
1.4. Цели работы.....	9
2. Влияние условий нагружения.....	11
2.1. Влияние условий теплообмена.....	11
2.2. Влияние скорости нагружения.....	13
3. Влияние свойств материала.....	16
3.1. Влияние химического состава материала.....	16
3.2. Влияние условий задания начальной формы и предыдущих нагрузений.....	17
3.3. Влияние толщины образца.....	21
4. Заключение.....	24
Список литературы.....	25

Введение

В некоторых сплавах при их нагреве до определённых температур можно наблюдать эффект памяти формы. Сущность этого эффекта заключается в том, что деформации, сохранившиеся в теле после прекращения воздействия внешних сил при низких температурах, могут исчезнуть при нагревании этого тела до некоторого порога.

Поведение сплавов с памятью формы зависит как от их внутренних свойств, так и от свойств окружающей среды: обратные и прямые превращения в этих сплавах тесно связаны с их температурой, которая может по-разному изменяться в зависимости от обстоятельств: температуры тел, находящихся в контакте с материалом, а также их коэффициента теплоотдачи. Температура, отличающаяся от предполагаемой температуры эксплуатации в большую сторону, может привести к непреднамеренному срабатыванию механизма; температура, отличающаяся в меньшую сторону, — к недовозврату деформаций. Поскольку материалы с памятью формы могут использоваться в том числе в обстоятельствах, где от них требуется высокая точность, — в медицине, где ошибка может причинить ущерб пациенту, или в космических аппаратах, где замена неправильно работающей детали может оказаться чрезвычайно сложной из-за удалённости от Земли, — возникает естественная потребность как можно более точно предсказывать, как подобные материалы будут вести себя при различных условиях. Основные деформационные механизмы в материалах с памятью формы — прямое мартенситное превращение, во время которого выделяется тепло, и обратное мартенситное превращение, во время которого тепло поглощается, — вызывают необходимость учитывать в предсказаниях количество выделяемой/поглощаемой скрытой теплоты превращения, поскольку она приводит к изменению температуры образца относительно ожидаемой.

Цель данной обзорной работы — изучить влияние внутренних источников тепла на деформационное поведение сплавов с памятью формы. Для этого анализируется ряд статей с экспериментальными данными, связанными в том числе с внутренней теплотой превращения. На основе сведений о том, как для различных сплавов и внешних условий изменяется значимость вклада внутренней теплоты превращения, устанавливаются общие закономерности.

1. Основные понятия

1.1. О материалах с памятью формы

Физические свойства материалов, находящихся в твёрдом агрегатном состоянии, во многом зависят от их кристаллических структур, описываемых кристаллическими решётками, возле узлов которых располагаются атомы. Некоторые материалы могут при одинаковых химических составах обладать несколькими устойчивыми вариантами кристаллических решёток.

Кристаллические решётки состоят из элементарных ячеек — минимальных объёмов кристалла, позволяющих параллельными переносами получить всю его структуру; для описания этих элементарных ячеек принято выбирать решётки Браве, отвечающие следующим условиям, расположенным в порядке снижения приоритета: ячейка должна обладать как можно большим количеством элементов симметрии, ячейка должна обладать как можно большим количеством прямых углов, ячейка должна содержать как можно меньше узлов. Различные фазы материала — его физически однородные части, отделённые друг от друга заметными границами, — характеризуются разными видами по-разному повернутых примитивных ячеек. Изменение кристаллических решёток при переходе материала из аустенитной (высокотемпературной) фазы в мартенситную (низкотемпературную) лежит в основе эффекта памяти формы.

Материалу с памятью формы, нагретому до достаточно высоких температур (но ниже температуры плавления), можно задать некоторую начальную форму. Диапазон подходящих для этого температур, а также способы последующего охлаждения зависят от конкретного материала; условия, при которых происходит задание формы (температура и продолжительность термообработки, скорость охлаждения), влияют на свойства получившейся детали, в том числе на температуры начала и конца прямого и обратного превращения (в случае термоупругого превращения первого рода $M_f < M_s < A_s < A_f$: температуры конца прямого мартенситного превращения, начала прямого мартенситного превращения, начала обратного мартенситного превращения, конца обратного мартенситного превращения; в случае термоупругого превращения второго рода $M_f < A_s < M_s < A_f$) [1], [8], [17].

Ниже на Рис.1 показано, как изменяется электросопротивление при прямом и обратном мартенситных превращениях в случаях термоупругого превращения первого и второго рода соответственно. Термоупругость превращения означает, что рост и уменьшение кристаллов мартенсита соответствует скорости охлаждения и нагрева материала соответственно [1].

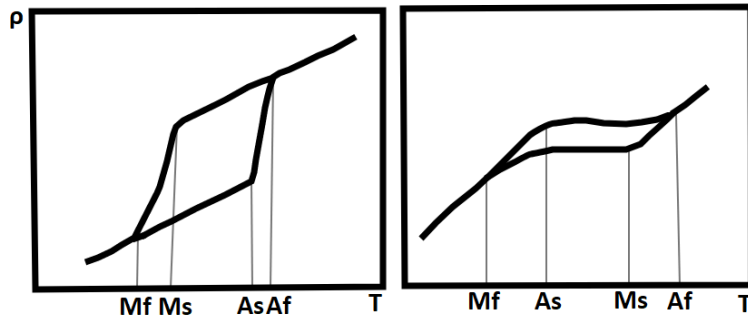


Рис. 1. Зависимость электросопротивления от температуры

До тех пор, пока сплав находится в температурном диапазоне от Af до As, его устойчивой модификацией является аустенит, но при понижении температуры до Ms устойчивой формой становится мартенсит. Начинается мартенситное превращение, которое становится источником дополнительных напряжений в материале из-за склонности мартенсита к двойникованию: сдвигу по плоскости скольжения на ns , где s — вектор сдвига и n — порядковый номер сдвига. После того, как материал перейдет в мартенситную форму, можно будет задать ему некоторые деформации. При нагреве материала до исходного аустенитного диапазона температур он потеряет значительную часть полученных напряжений, хотя полный возврат при этом не гарантируется. Длительное использование материала с памятью формы ведёт к его деградации и увеличению недовозврата [2].

Появление мартенсита вызывает деформацию исходной формы кристалла и влечёт появление на его поверхности заметного рельефа.

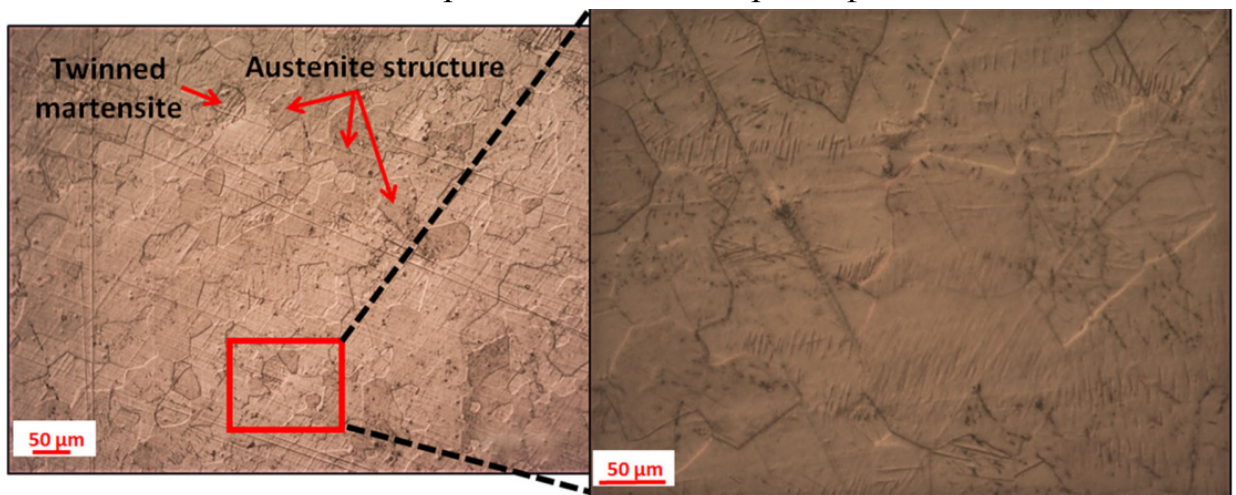


Рис. 2. Изображение микроструктуры необработанной поверхности NiTi [6].

При прямом мартенситном превращении — превращении аустенита в мартенсит — атомы вещества упорядоченно смещаются на расстояния меньше межатомных. Этот процесс происходит кооперативно и, за счёт

взаимосвязанности перемещений, быстро — в отличие от диффузионных превращений, скорость которых в твёрдых телах обычно мала. В процессе мартенситного превращения в старой аустенитной фазе зарождаются кристаллы новой мартенситной фазы, которые стремительно растут за счёт перестройки кристаллической решётки аустенита — происходит сдвиг, во время которого в области, окружающей кристалл, возникают значительные напряжения. Если движущая сила превращения сравняется по модулю с упругой энергией, противодействующей росту кристалла, рост кристалла остановится. При этом понижение температуры может возобновить его рост, а её повышение — заставить его уменьшиться. При быстром охлаждении, затрудняющем диффузию, существенно увеличивается вероятность того, что превращение пойдёт по мартенситному механизму, не требующему значительных перемещений атомов, однако в некоторых материалах добиться превращения аустенита именно в мартенсит бывает трудно [1].

Превращение аустенита в мартенсит может происходить и при температуре, превышающей M_s , если аустенит подвергается пластической деформации, причём чем выше температура, тем большая деформация необходима для этого явления; ориентация появляющегося при этом мартенсита зависит от направления приложения нагрузки. После снятия нагрузки с мартенситом, находящимся в характерном для аустенита температурном диапазоне, сразу начнёт происходить обратное превращение, за счёт которого материал возвращается к своей изначальной форме. Это свойство, называемое сверхэластичностью, обуславливает многие возможности для применения материалов с памятью формы

1.2. Применение материалов с памятью формы

С момента открытия эффекта памяти формы материалы, им обладающие, успели найти применение в различных областях производства.

Стойкость к коррозии, нетоксичность и высокая точность механических воздействий, совершаемых при помощи эффекта памяти формы, обеспечили никелиду титана применение в медицине. Благодаря биологической совместимости он используется не только в самих медицинских устройствах, но и как материал для вживления в человеческие тела — в виде стентов, расширяющих суженные участки кровеносной системы, креплений, фиксирующих повреждённые суставы, брекет-систем и так далее. Современные исследователи рассматривают возможность замены микромышечных волокон пружинами из никелида титана [33],[34].

Различные материалы с памятью формы активно используются в робототехнике. Несмотря на то, что эти сплавы могут быть подвержены сильной усталостной деградации при циклическом нагружении, что затрудняет

создание двигателей на их основе, они оказываются крайне полезны, когда возникает необходимость выполнить некоторое высокоточное действие небольшое количество раз. Привод, сделанный из материала с памятью формы, также имеет преимущество в виде малого веса [32].

Микроструктура сплавов с памятью формы позволяет им хорошо поглощать колебания из-за склонности мартенсита к двойникованию: смена ориентаций двойниковыми кристаллами ведёт к рассеиванию энергии за счёт внутреннего трения. В то же время скрытая теплота превращения, выделяемая или поглощаемая во время фазовых переходов, обеспечивает в несколько раз большую демпфирующую способность, чем смена ориентаций в мартенситном состоянии [7].

1.3. Тепловые процессы в материалах с памятью формы

Свободная энергия каждой из фаз материала с памятью, аустенитной и мартенситной, по-своему зависит от температуры. Если отложить эти зависимости на графике, то точка их пересечения определит некоторую температуру, выше которой будет устойчив аустенит, а ниже которой — мартенсит.

Когда сплав охлаждается ниже переходной температуры, в нём появляется движущая сила, благодаря которой мартенситное превращение может начаться. Движущая сила представляет из себя разность свободных энергий для аустенитной и мартенситной фазы. Мартенситное превращение сопровождается возникновением большого количества энергии упругих деформаций, которую необходимо компенсировать, по причине чего значение движущей силы должно быть достаточно большим: без этого фазовый переход не будет энергетически выгодным. Фактически прямое превращение начинается несколько ниже температуры, при которой устойчив мартенсит.

Процесс фазового перехода зависит не только от температуры, при котором он происходит, но и от скорости её изменения. Если материал с памятью формы, рассчитанный на использование при комнатной температуре, из аустенитной фазы быстро достигнет достаточно низкой температуры, около восьмидесяти градусов по Кельвину (температура жидкого азота), то мартенситное превращение не произойдёт — в результате получится переохлаждённый аустенит, который начнёт превращаться в мартенсит при нагреве до M_f .

В процессе прямого превращения материал выделяет скрытую теплоту превращения, а в процессе обратного превращения — её поглощает. Количество этой теплоты обычно вычисляется с использованием метода дифференциальной сканирующей калориметрии.

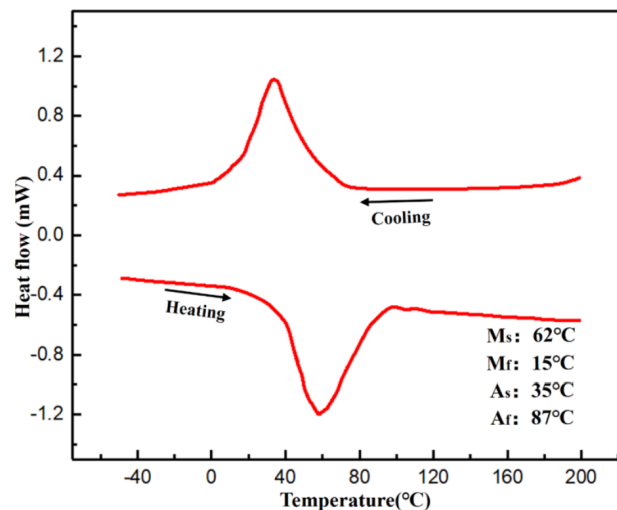


Рис. 3, кривая ДСК для нитинола с процентным содержанием никеля 57.36, [15]

При использовании этого метода закреплённый держателем образец нагревается постоянным тепловым потоком. Одновременно с этим потоком нагревается пустой держатель — или держатель с эталоном — так, чтобы температуры образца и пустого держателя оставались одинаковыми. Через разницу в том, насколько больше тепла требуется для нагревания образца до определённой температуры, чем для нагревания пустого держателя, строится график зависимости теплового потока от температуры, показанный на Рисунке 3. Скрытая теплота превращения находится через интегрирование областей, находящихся под пиками. Этим методом вычисляются также M_s , M_f , A_s , A_f , однако этот метод может приводить к существенной погрешности при вычислении M_f [12].

Альтернативным методом вычисления скрытой теплоты превращения является, например, метод инфракрасной термографии, который обеспечивает более точный результат в случаях, когда на графиках, полученных при использовании дифференциальной сканирующей калориметрии, отсутствуют ярко выраженные пики, однако он не может применяться на очень тонких образцах [10], [11].

В зависимости от того, при каких внешних условиях происходит фазовый переход, скрытая теплота превращения влияет на него в разной степени: в некоторых случаях она может перейти в окружающую среду, практически не затронув происходящие в материале деформационные процессы, но иногда её наличие заметно изменяет процесс превращения.

1.4. Цели работы

Целью данной реферативной выпускной квалификационной работы является изучение влияния внутренних источников тепла на деформационное поведение сплавов с памятью формы. Для достижения этой цели анализируются научные

статьи, содержащие сведения о вкладе скрытой теплоты превращения при различных условиях нагружения и для различных по свойствам сплавов.

2. Влияние условий нагружения

2.1. Влияние условий теплообмена

То, сколько тепла будет получать или отдавать тело из-за контакта со внешней средой, зависит от коэффициента теплоотдачи окружающей среды и её температуры. Расчёт, произведённый для тела, находящегося в атмосфере воздуха, может оказаться неточным для тела, находящегося в жидкости или вакууме.

Если в системе отсутствует теплообмен, то есть процесс происходит адиабатически, то вклад скрытой теплоты превращения будет максимальным из возможных: вся скрытая теплота превращения пойдёт в этом случае на нагрев/охлаждение тела, что замедлит падение/рост температуры и, следовательно, сам процесс.

В исследовании [14] образец $Ti_{20}Hf_{15}Zr_{15}Cu_{25}Ni_{25}$ с постоянной скоростью нагружали при различных температурах.

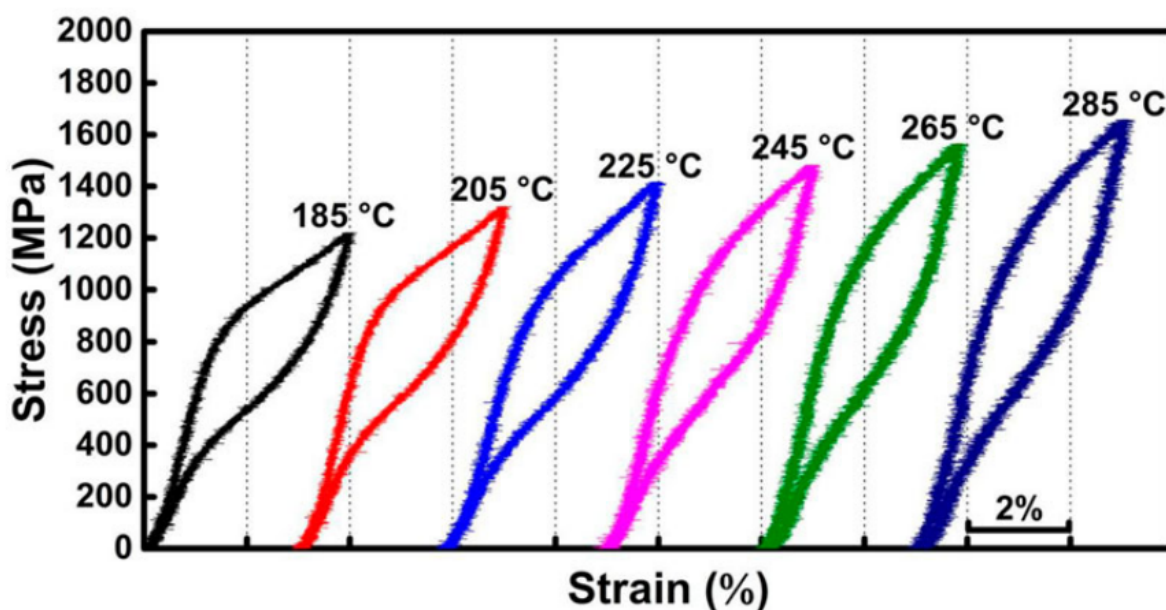


Рис.4, диаграммы деформирования при различных температурах, [14].

При увеличении температуры зависимость напряжений и деформаций становится ближе к линейной.

В исследовании [9] рассматривалось поведение механизма, состоящего из нитиноловых (45% содержание никеля) проводов и полиамидовых полосок. Изучалось поведение нитинола в условиях атмосферы и вакуума. Воздух обладает сравнительно невысокой теплопроводностью, в то время как в вакууме (если считать его абсолютным) теплообмен полностью основывается на

излучении. В обоих случаях теплообмен с окружающей средой значительно ограничен.

Авторы исследования обратили внимание на периоды, в которые температура образца не повышалась, и установили, что эти периоды, связанные со скрытой теплотой поглощения, в несколько раз дольше длились в вакууме.

Конвекция — вид теплопередачи, при котором тепло переносится потоками вещества. Перемещение вещества, составляющего окружающую среду, под действием внешних сил, вызывает вынужденную конвекцию: более холодные/тёплые относительно рассматриваемого тела слои вещества непрерывно заменяют слои, уже нагретые/охладившиеся из-за контакта с телом. Усиление конвекции как одного из факторов теплообмена позволяет более эффективно отводить от тела излишек тепла или подводить к нему дополнительное тепло, тем самым снижая влияние скрытой теплоты превращения.

В исследовании [16] на основе экспериментальных данных, полученных в [18], сравнивали поведение образцов в разных условиях: в стоячем воздухе, под потоком воздуха со скоростью 2 м/с и под потоком воздуха со скоростью 17 м/с. Оно практически совпадало у образцов, находящихся под воздействием воздушных потоков, и их ход прямого мартенситного превращения был довольно незначительно ускорен по сравнению с ходом мартенситного превращения образца, находившегося в стоячем воздухе.

В исследовании [19] был предоставлен график циклического нагружения тонкой проволоки из нитинола (56% содержание никеля) с включенным и выключенным вентилятором, обдувающим образец со скоростью 1-2 м/с.

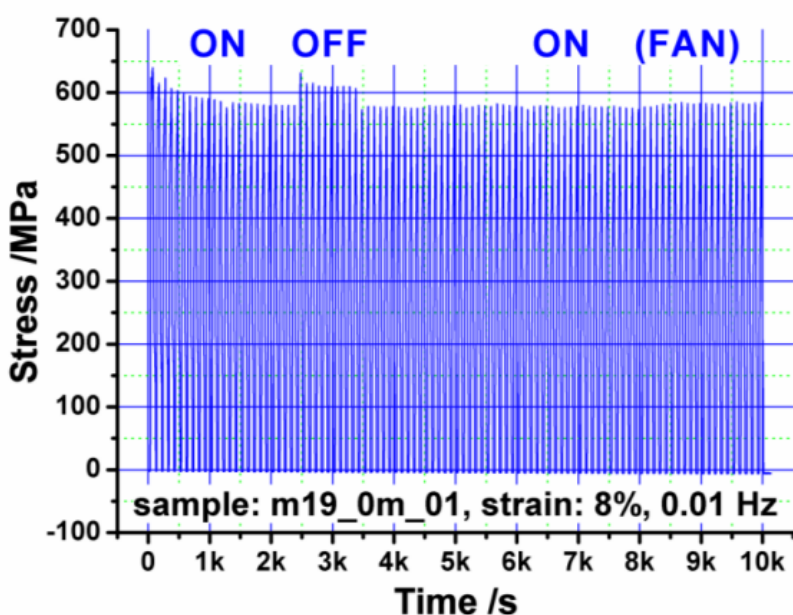


Рис. 5, График нагружения проволоки из нитинола со включенным и выключенным вентилятором [19].

Выключение вентилятора и сведение конвекции только до естественной повысило максимальные значения нагрузки.

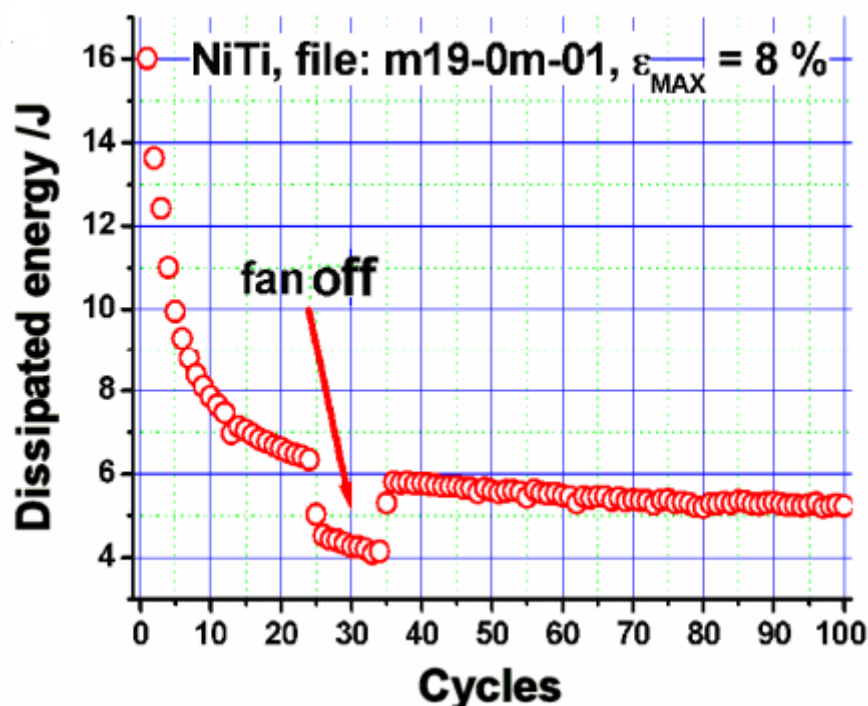


Рис. 6. График рассеивания энергии при циклическом нагружении со включенным и выключенным вентилятором [19].

График рассеивания энергии показывает, сколько тепла позволял рассеивать вентилятор.

2.2. Влияние скорости нагружения

При нагружении с достаточно большой скоростью деформации скрытая теплота превращения, выделяемая при превращении аустенита в мартенсит, не успевает рассеяться, что вызывает нагрев образца. Эксперименты показывают, что при достаточно малых скоростях деформирования, меньше $10^{-4} / c$, тепло, в целом, рассеивается в окружающую среду и не вызывает заметного нагревания образца, процесс можно считать изотермическим. При повышении скорости деформация процесс постепенно приближается к адиабате; при нормальных условиях его можно считать адиабатическим при скорости около $10^{-1} / c$, дальнейшее увеличение скорости нагружения будет уже не таким заметным на графиках. Очень высокие скорости нагружения могут привести образец к необратимым деформациям [21].

В исследовании [22] образцы из сплава Cu-8.15Al-10.71Mn-0.43Ti-0.086B, имеющие форму кости, подвергались одноосному растяжению со следующими скоростями деформации:

$0.125 \cdot 10^{-4} / с$, $0.2 \cdot 10^4 / с$, $2.08 \cdot 10^{-4}$, $12.5 \cdot 10^4$.

Состояние образцов после нагружений тщательно анализировалось при помощи рентгеноструктурного анализа.

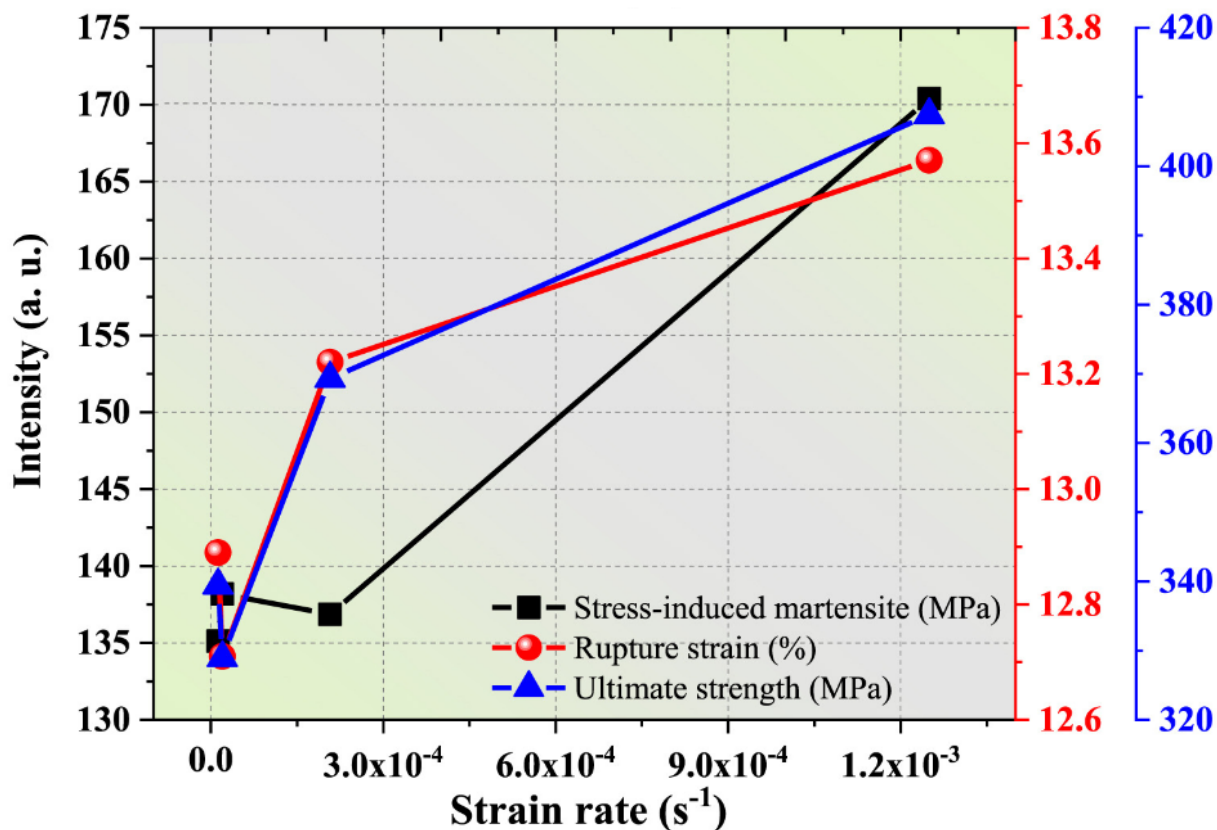


Рис. 7. Количество мартенсита, наведённого напряжением, количество необратимых повреждений, предел прочности [22].

Авторы статьи связывают рост предела прочности и количества наведённого напряжением мартенсита с нагревом образца из-за выделяемой скрытой теплоты превращения.

В исследовании [23] рассматривается количество тепла, выделяемого образцом из сплава Ni₅₄Fe₁₉Ga₂₇, при различных скоростях нагружения.

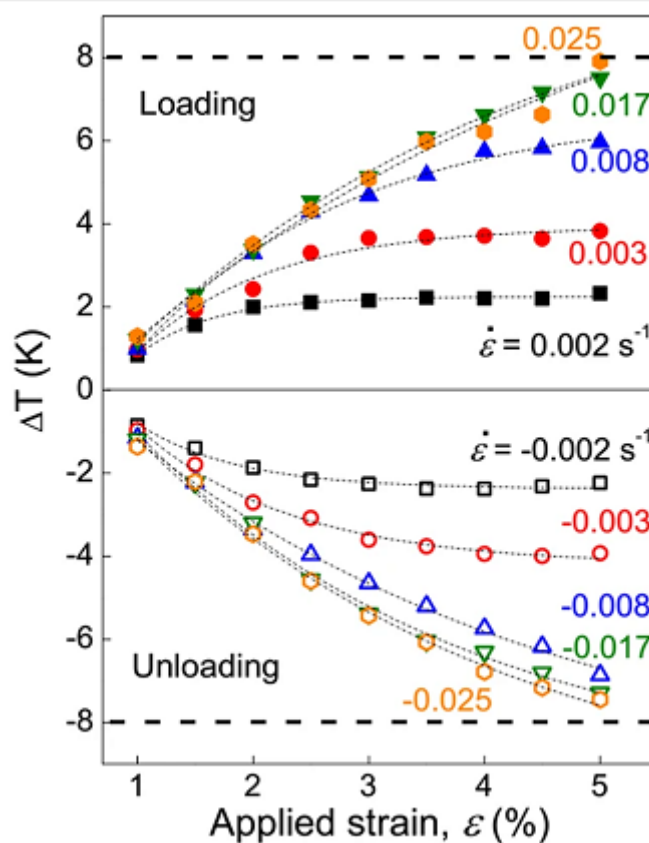


Рис. 8. Количество тепла при различных скоростях нагружения [23].

При увеличении скорости деформации количество теплоты растёт, однако, как видно из графика, этот рост замедляется при достаточном увеличении скорости нагружения — с приближением процесса к адиабатическому количество теплоты приближается к своему пределу.

3. Влияние свойств материала

3.1. Влияние химического состава материала

Различные сплавы с памятью формы могут значительно отличаться друг от друга по свойствам. Даже добавление незначительного количества примесей в состав сплава может значительно изменить его рабочие диапазоны.

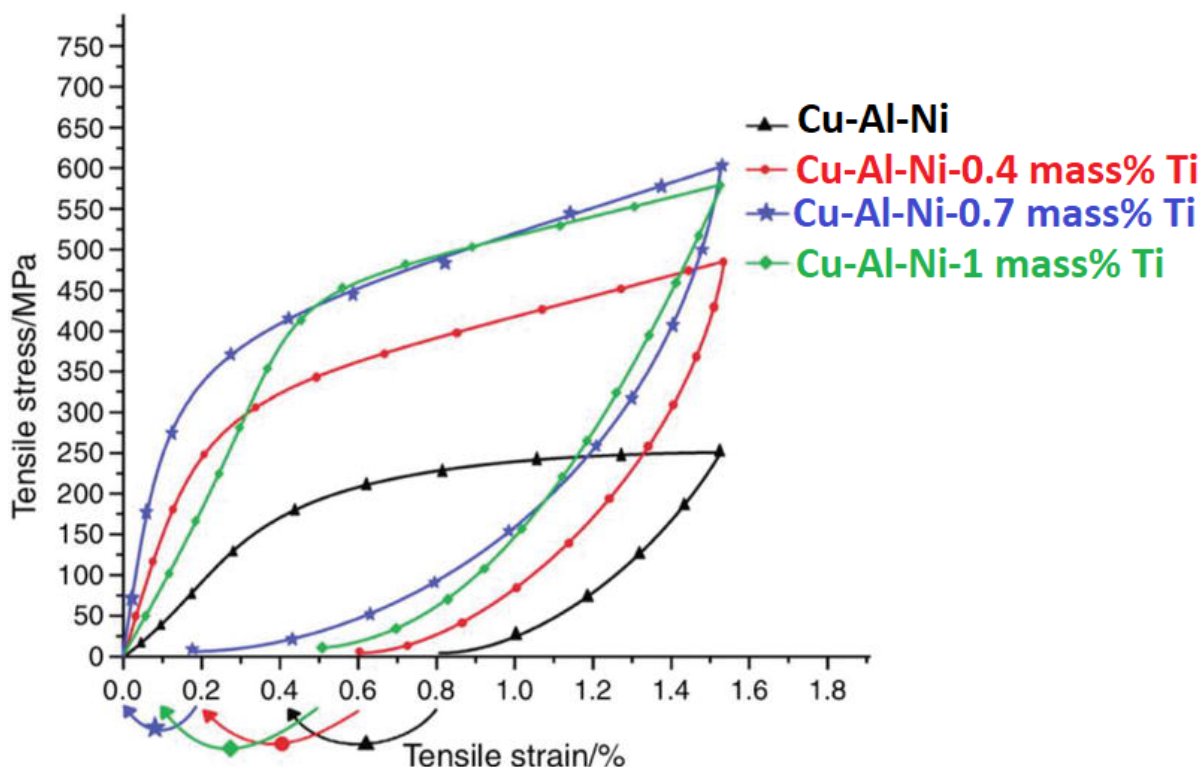


Рис. 9. Графики нагружения образца из Cu-Al-Ni с различными примесями [24].

Одним из наиболее часто используемых сплавов с памятью формы является нитинол — никелид титана. Несмотря на сложности в его производстве (титан является химически активным элементом и вступает в реакцию с большинством газов; из-за этого его плавка должна происходить в условиях вакуума или в окружении инертных газов), этот материал активно применяется в медицине и других областях.

Нитинол — это класс сплавов с различными процентными содержаниями никеля и титана; название конкретного сплава обозначается через процентное содержание никеля. В исследовании [25] установлено, что нитинол с приблизительно равным содержанием атомов никеля и титана обладает значительно большим значением скрытой теплоты превращения по сравнению с другими вариантами нитинола, где содержание никеля близко к 50%.

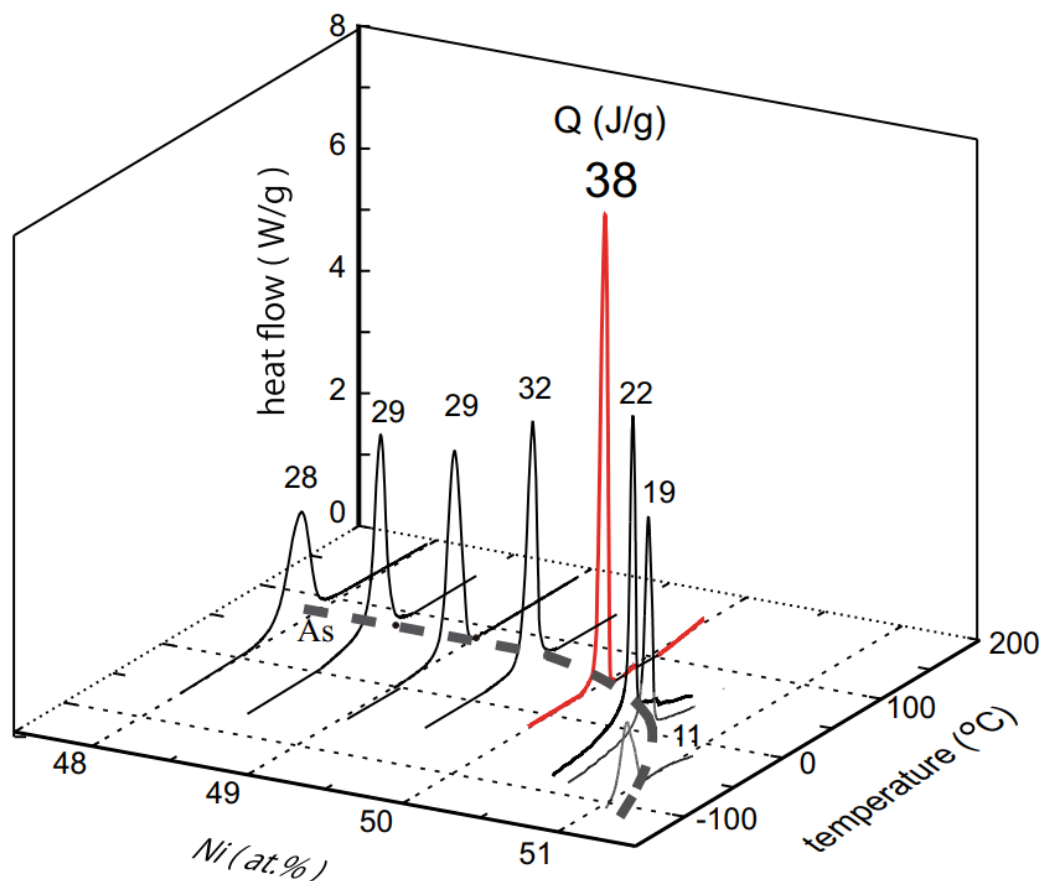


Рис. 10. Количество скрытой теплоты в нитиноле с различным процентным содержанием никеля [25].

Для установления этого результата нитеобразные образцы нитинола изучались при помощи дифференциальной сканирующей калориметрии.

3.2. Влияние условий задания начальной формы и предыдущих нагружений.

Условия, при которых обрабатываются образцы, могут значительно изменять их свойства, в том числе смещать диапазоны начала и конца прямого и обратного превращения, а также изменять количество скрытой теплоты превращения.

В исследовании [26] холоднотянутые проволоки из Ti-50.5at.%Ni отжигали при температуре в 500 градусов по Цельсию, а затем измеряли их скрытую теплоту превращения при помощи дифференциальной сканирующей калориметрии.

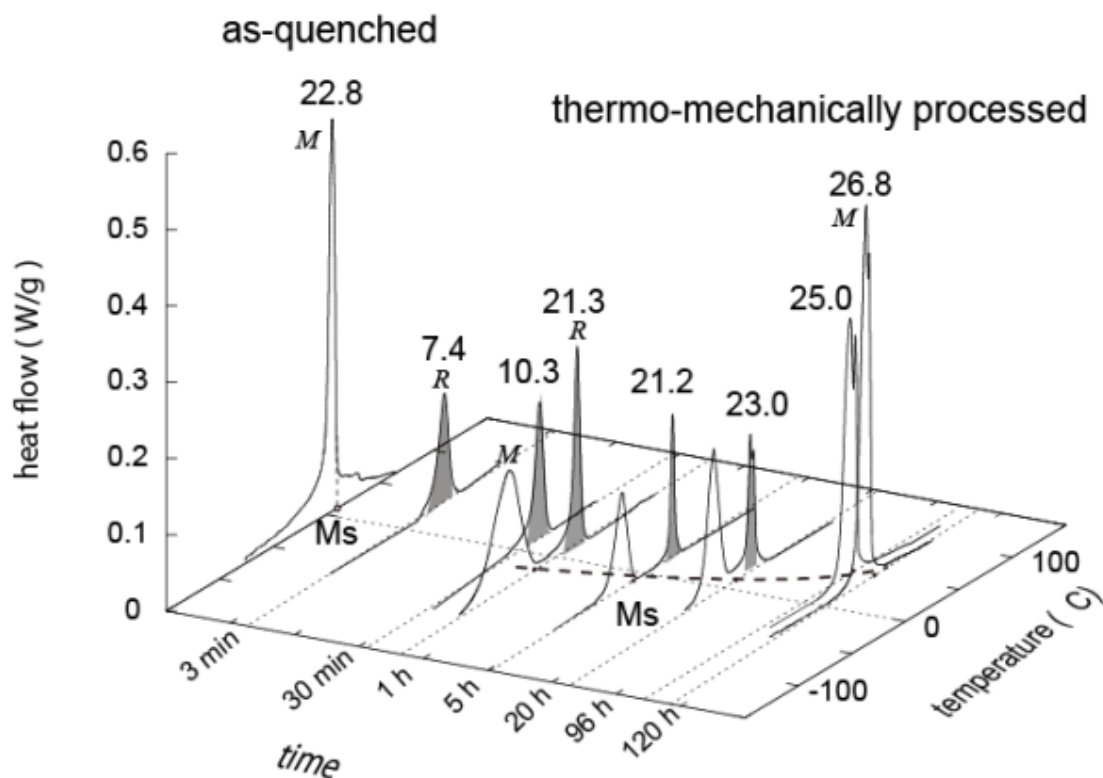


Рис. 11. Количество скрытой теплоты превращения для сплава Ti-50.5at.%Ni при разных продолжительностях отжигах [26].

Непродолжительный отжиг значительно уменьшил количество скрытой теплоты превращения, однако более долгий отжиг практически не изменял её количество или даже его увеличивал. Исследователи связали этот эффект с вероятным выпадением в осадок TiNi₂ и Ni₄Ti₃, что уменьшило состав никеля в сплаве и, приблизив состав к эквиатомному, увеличило скрытую теплоту превращения сплава.

Похожий результат в исследовании [31] продемонстрировали образцы из Cu₇₉-Al₁₂-Ni₄-Nb₅:

Name	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S^{M \rightarrow A}$ (J/kg K)	$\Delta S^{A \rightarrow M}$ (J/kg K)
0 h	10.7	9.49	21.71	19.26
1 h	10.2	9.36	19.96	18.32
2 h	10.0	8.72	19.45	16.96
3 h	10.4	8.47	20.09	16.36
6 h	6.79	8.83	12.82	16.67
12 h	7.26	10.0	13.77	18.97

Рис.12, изменение энтропии и энтальпии при прямом и обратном мартенситных превращениях.

Температура, при которой проводится отжиг, также оказывает влияние на свойства материала. В исследовании [28] проводился отжиг тонких пластин из Ti–22Nb–6Zr при температурах 773, 823, 873, 973, 1073 и 1173 градуса по Кельвину. В результате кривые нагружения пластин значительно различались.

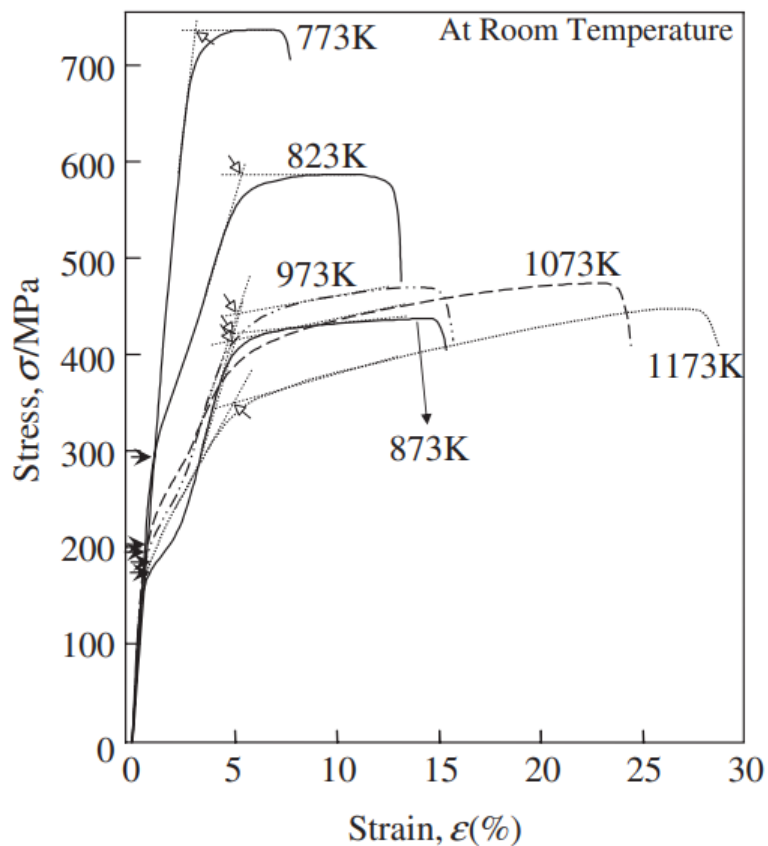


Рис. 13. Кривые нагружения для пластин из Ti–22Nb–6Zr, подвергнутых отжигу при различных температурах [28].

В этом исследовании при помощи сканирующего электронного микроскопа был исследован размер зёрен в сплаве.

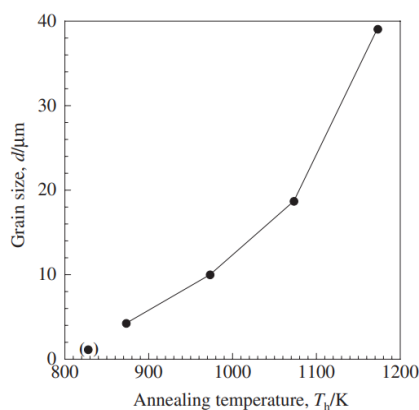


Рис. 14, зависимость размера зёрен от температуры отжига, [28]

Считается, что рост размера зёрен (до некоторого критического порога) способен увеличивать скрытую теплоту превращения сплава Ni50.75Ti [29].

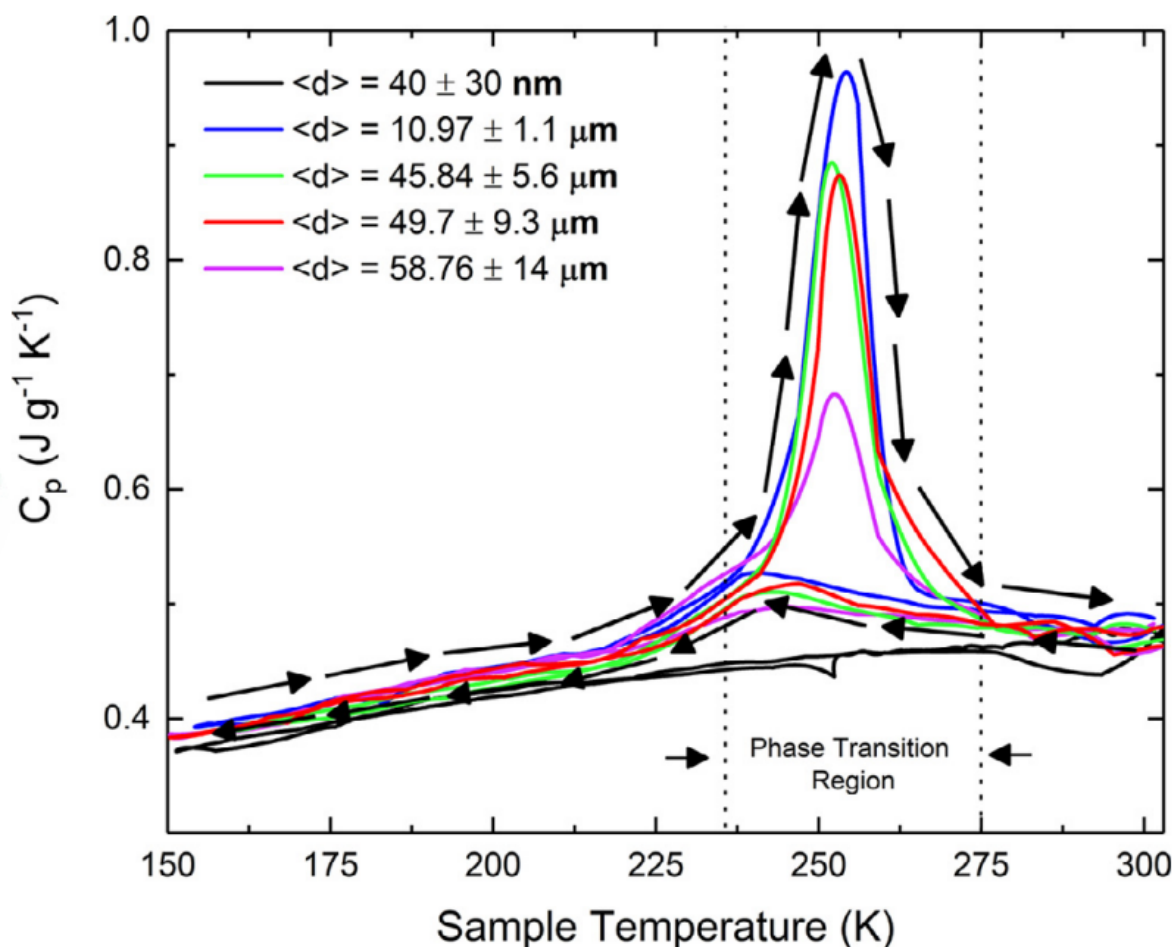


Рис. 15. Необходимое количество тепла для изменения температуры для образцов с различными размерами зёрен [29].

При долгом использовании сплавы с памятью формы испытывают явление функциональной усталости: спустя определённое число циклов нагрузки-разгрузки сплавы утрачивают свои изначальные свойства; в частности, увеличивается количество необратимых деформаций при последующих нагружениях. Число циклов, которые сплав может выдержать без значительного ухудшения свойств, зависит от его состава и условий нагружения. Считается, что хрупкие сплавы, такие как соединения трёх металлов с формулой X_2YZ (сплавы Гейслера), достаточно быстро накапливают необратимые деформации [27].

Несмотря на то, что NiTi относится к более устойчивым к усталости сплавам, высокая частота нагрузки всё ещё может достаточно быстро привести к его деградации. В исследовании [30] монокристаллы Ni50.8Ti с ориентацией 011 и 001 циклически нагружались с разной частотой. Для обоих кристаллов уровень напряжения рос с увеличением частоты нагружения, что связывалось

исследователями с не успевающей диссипировать скрытой теплотой превращения.

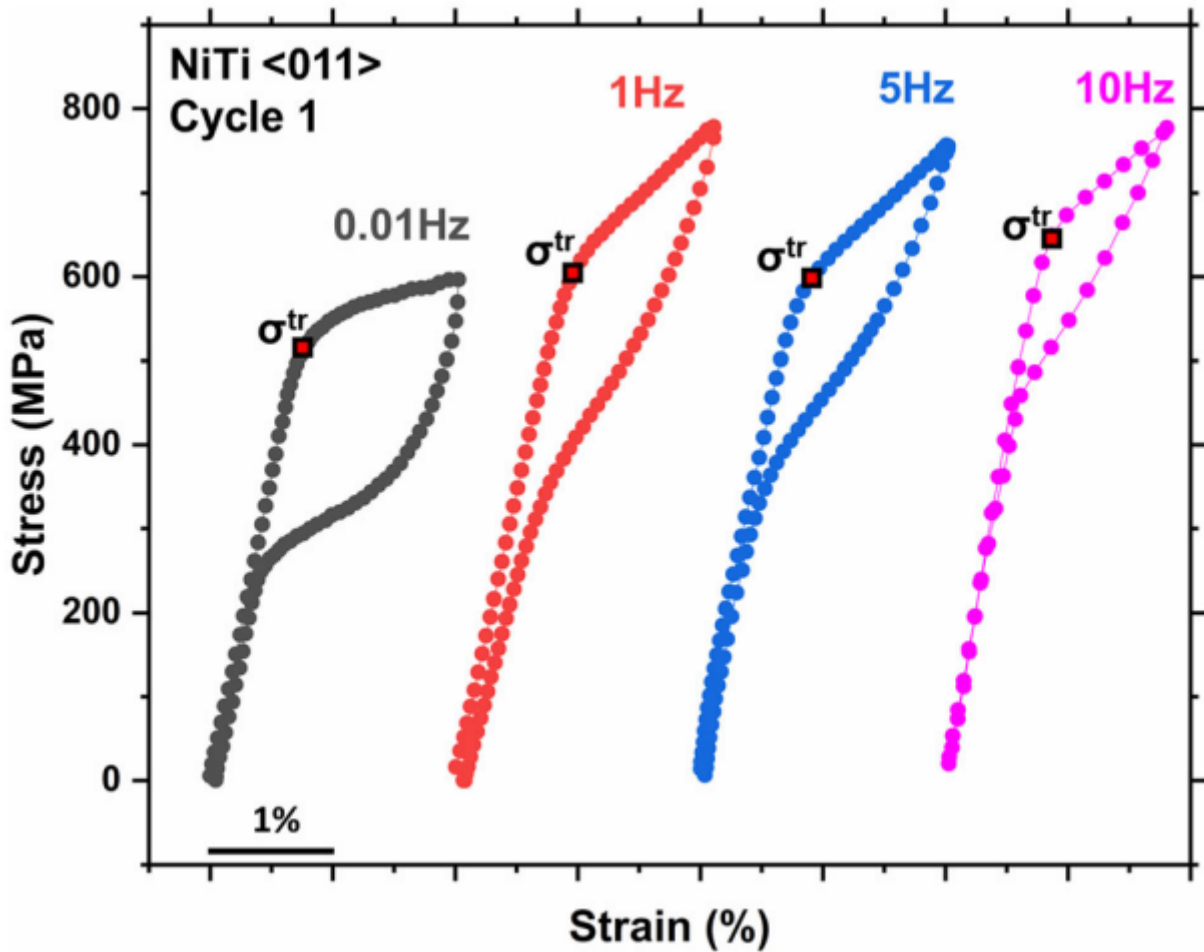


Рис. 16. Кривые нагружения для монокристаллов Ni50.8Ti с ориентацией 011 для разных частот нагружения; первое нагружение в цикле [30].

Изменения, происходящие с монокристаллом Ni50.8Ti с ориентацией 011 при высокочастотном нагружении связываются в том числе с более высоким уровнем испытываемых напряжений [19], [20]

3.3. Влияние толщины образца

С ростом толщины образца его площадь его границы с окружающей средой растёт медленнее, чем его объём, что затрудняет отвод скрытой теплоты превращения.

В исследовании [19] образцы проволок из нитинола с содержанием никеля 56% диаметром 2.46 миллиметра и проволока диаметром 0.5 миллиметра подвергались циклическому нагружению.

Более толстая проволока в процессе значительно нагревалась из-за скрытой теплоты превращения, даже несмотря на вынужденную конвекцию при помощи фена и высокую влажность воздуха, увеличивающую его теплопроводность.

Только при достаточно низкой частоте нагружения температура образца сохранялась близкой к комнатной

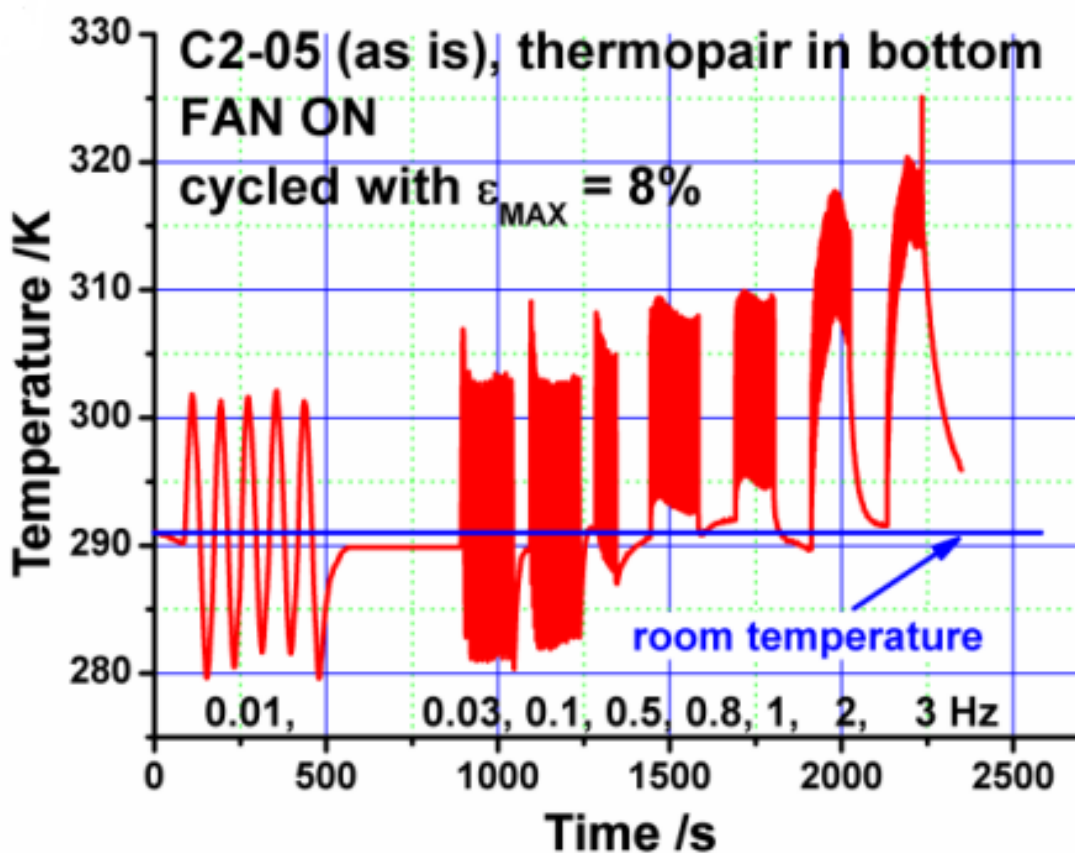


Рис. 17, график зависимости температуры проволоки от времени при циклическом нагружении с максимальной деформацией 8% при обдувании образца вентилятором [19].

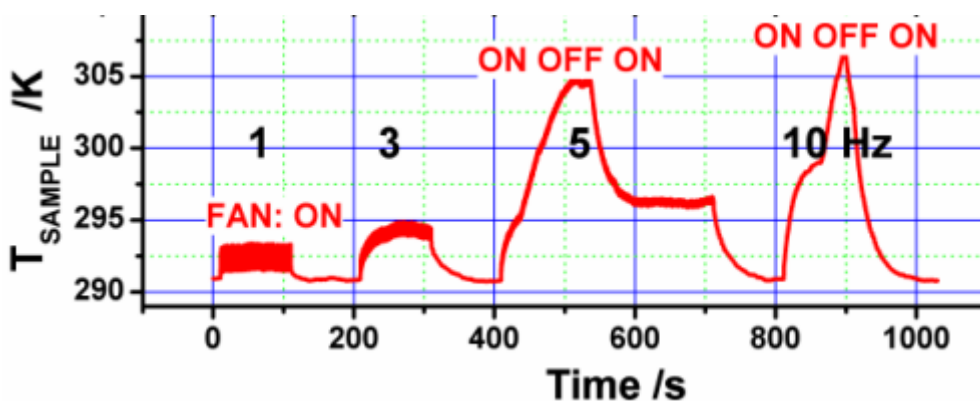


Рис. 18. График зависимости температуры проволоки от времени при циклическом нагружении с максимальной деформации 1.8% при обдувании образца вентилятором и без обдувания образца вентилятором [19].

Кроме того, из-за того, что меньший процент их общей скрытой теплоты рассеивается в окружающей среде, более толстые образцы при циклическом нагружении быстрее подвергаются эффекту функциональной усталости [20].

4. Заключение

В ходе обзора научных статей были получены следующие выводы:

1. Значимость скрытой теплоты превращения, выделяемой или поглощаемой в ходе мартенситных и аустенитных превращений, зависит как от параметров материала, в котором происходят превращения, и от геометрии образца, так и от свойств внешней среды. Условия, в которых скрытая теплота превращения не успевает диссипировать, приводят к нагреву образца, что вызывает рост напряжений. Выбор материала и дополнительная его обработка могут значительно повлиять на количество скрытой теплоты, выделяемой/поглощаемой им в ходе фазовых переходов.
2. Влияние скрытой теплоты превращения может быть сведено к минимуму условиями внешней среды и нагружения. При достаточно высоком коэффициенте теплопроводности вещества, окружающего тело, и не слишком высокой скорости нагружения, скрытая теплота не окажет значимого влияния на процесс. В некоторых ситуациях недостаточно высокий коэффициент теплопроводности окружающей среды или высокую скорость нагружения можно в некоторой степени компенсировать вынужденной конвекцией;
3. Существуют различные способы определить поглощаемое/высвобождаемое в ходе фазового превращения количество скрытой теплоты. Одним из наиболее активно используемых способов является дифференциальная сканирующая калориметрия, которая, в случае необходимости, может быть заменена, например, инфракрасной термографией.

Список литературы

- [1] Ооцука К. Симидзу К. Судзуки Ю, перевод с яп. И. И. Дружинина под ред. Фунакубо Х., “Сплавы с эффектом памяти формы”, 1990.
- [2] Лихачев В. А., “Эффект памяти формы”, 1997.
- [3] Беляев С.П., Волков А.Е., Евард М.Е., “Микроструктурное моделирование необратимой деформации сплавов с памятью формы”, 1998.
- [4] Курдюмов Г. В., “Явления закалки и отпуска стали”, 1960.
- [5] Сивухин Д.В., “Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика”, 1990.
- [6] Emre Altas, Meltem Altin Karatas, Hasan Gokkaya, and Yuksel Akinay, ”Surface Integrity of NiTi Shape Memory Alloy in Milling with Cryogenic Heat Treated Cutting Tools under Different Cutting Conditions”, 2021.
- [7] Anargyros A. Karakalas, Theodoros T. Machairas, Dimitris C. Lagoudas, Dimitris A. Saravanos, “Quantification of Shape Memory Alloy Damping Capabilities Through the Prediction of Inherent Behavioral Aspects”, 2021.
- [8] Farideh Jahanbazi Asl, Mahmoud Kadkhodaei, Fathallah Karimzadeh, “The effects of shape-setting on transformation temperatures of pseudoelastic shape memory alloy springs”, 2019.
- [9] Louis Wei-Yu Feng , Peter Martinez, Michael Dropmann , Manfred Ehresmann , Samuel Ginsberg, Georg Herdrich , Rene Laufer, “MEDUSA – Mechanism for Entrapment of Debris Using Shape memory Alloy”, 2017.
- [10] Henrique Martinni Ramos de Oliveira, Herv´e Loucheb, Estephanie Nobre, Dantas Grassia, Denis Faviera, “Specific forward/reverse latent heat and martensite fraction measurement during superelastic deformation of nanostructured NiTi wires”, 2020.
- [11] Rodrigo Amaral M de Andrade, Tadeu Castro da Silva, ”Use of Infrared Temperature Sensor to Estimate the Evolution of Transformation Temperature of SMA Actuator Wires”, 2023.
- [12] Kato Hiroyuki; Sasaki Kazuaki, ”Avoiding error of determining the martensite finish temperature due to thermal inertia in differential scanning calorimetry : model and experiment of Ni-Ti and Cu-Al-Ni shape memory alloys”, 2012.
- [13] Hui Wang, Haiyou Huang, Jianxin Xie, “Effects of Strain Rate and Measuring Temperature on the Elastocaloric Cooling in a Columnar-Grained Cu71Al17.5Mn11.5 Shape Memory Alloy”, 2017.

- [14] Shaohui Li, Daoyong Cong, Zhen Chen, Shengwei Li, Chao Song, Yuxian Cao, Zhihua Nie & Yandong Wang, “A high-entropy high-temperature shape memory alloy with large and complete superelastic recovery”, 2021.
- [15] Tao Yao, Yang Yang, Yongquan Wang, Xiaoxiao Han, “4D printing and collaborative design of highly flexible shape memory alloy structures: a case study for a metallic robot prototype”, 2021.
- [16] Y.J. He, Q.P. Sun, “On non-monotonic rate dependence of stress hysteresis of superelastic shape memory alloy bars”, 2011.
- [17] Hunter B. Gilbert, Robert J. Webster, ”Rapid, Reliable Shape Setting of Superelastic Nitinol for Prototyping Robots”, 2016
- [18] Y. J. He, “ Frequency-dependent temperature evolution in NiTi shape memory alloy under cyclic loading”, 2010.
- [19] V. Torra, A. Isalgue, M. Sade, F.C. Lovey, “Shape memory alloys as an effective tool to damp oscillations: Study of the fundamental parameters required to guarantee technological applications”, 2015.
- [20] : Chen, Ying, and Christopher A. Schuh. “Size Effects in Shape Memory Alloy Microwires.” *Acta Materialia* 59, no. 2 (January 2011): 537–553.
- [21] Zhengxiong Wang, Jiangyi Luo, Wangwang Kuang, Mingjiang Jin, Guisen Liu, Xuejun Jin, Yao Shen, “Strain Rate Effect on the Thermomechanical Behavior of NiTi Shape Memory Alloys: A Literature Review”, 2022.
- [22] Breno H.S. Andrade, David D.S. Silva, Ieverton C.A. Brito, Rafael E. Caluête, André R.R. Sousa, Rodinei M. Gomes, Danniell F. Oliveira, “Influence of strain rate on mechanical properties of a CuAlMnTiB shape memory alloy”, 2021.
- [23] Yang Li, Dewei Zhao, Jian Liu “Giant and reversible room-temperature elastocaloric effect in a single-crystalline Ni-Fe-Ga magnetic shape memory alloy”, 2016.
- [24] Safaa Najah Saud Al-Humairi, “Cu-Based Shape Memory Alloys: Modified Structures and Their Related Properties”, 2019.
- [25] Hiroyuki Kato, “Latent heat storage capacity of NiTi shape memory alloy”, 2020.
- [26] Hiroyuki Kato, “Latent heat of martensitic transformation in Nickel Titanium shape memory alloys depending on composition and thermo-mechanical processing”, 2020.
- [27] В.С. Калашников, И.И. Мусабилов, В.В. Коледов, В.А. Андреев, Д.В. Гундеров, В.Г. Шавров, “Функциональная усталость сплавов с эффектом

памяти формы систем Ni–Mn–Ga и Ni–Ti в условиях термоциклирования под постоянной нагрузкой”, 2019.

[28] Jae Il Kim¹, Hee Young Kim, Tomonari Inamura, Hideki Hosoda, Shuichi Miyazaki, “Effect of Annealing Temperature on Microstructure and Shape Memory Characteristics of Ti–22Nb–6Zr(at%) Biomedical Alloy”, 2006

[29] Ronald J. Warzoha, Nicholas T. Vu, Brian F. Donovan, Elena Cimpoiasu, Darin J. Sharar, Asher C. Leff, Adam A. Wilson, Andrew N. Smith, “Grain growth-induced thermal property enhancement of NiTi shape memory alloys for elastocaloric refrigeration and thermal energy storage systems”. 2020.

[30] R. Sidharth, A. S. K. Mohammed, H. Sehitoglu, “Functional Fatigue of NiTi Shape Memory Alloy: Effect of Loading Frequency and Source of Residual Strains”, 2022.

[31] Ibrahim Nazem Qader, Ercan Ercan, Bahar Ali Mohammed Faraj, Mediha Kok, Fethi Dagdelen, Yildirim Aydogdu, “The Influence of Time-Dependent Aging Process on the Thermodynamic Parameters and Microstructures of Quaternary Cu₇₉–Al₁₂–Ni₄–Nb₅ (wt%) Shape Memory Alloy”, 2020

[32] M. Balasubramanian, R. Srimath, L. Vignesh, S. Rajesh, “Application of shape memory alloys in engineering – A review”, 2021.

[33] Marcelo do Amaral Ferreira, Marco Antônio Luersen, Paulo Cesar Borges, “Nickel-titanium alloys: A systematic review”, 2012

[34] Swadhin Kumar Patel, Bikram Behera, Biswajit Swain, Rakesh Roshan, Deepak Sahoo, A. Behera, “A review on NiTi alloys for biomedical applications and their biocompatibility”, 2020