

Научная статья

УДК 66.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-14-25

ДЕФОРМАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ СИСТЕМ Ni–Ti–Nb И Ni–Ti–Nb–Zr

А.В. Скугорев¹, Д.В. Капитаненко¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация: Работа посвящена изучению процессов горячей и холодной пластической деформации труднодеформируемых сплавов с эффектом памяти формы систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr. Определены оптимальные режимы деформационной обработки исследуемых сплавов, обеспечивающие получение полуфабрикатов без поверхностных дефектов. Проведены исследования механических свойств горячедеформированных и холоднодеформированных полуфабрикатов из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr. Показано, что выбранные режимы обработки исследуемых сплавов позволяют обеспечить высокий уровень механических свойств материалов.

Ключевые слова: сплавы с эффектом памяти формы, горячая деформация, прессование, волочение, механические свойства, муфты термомеханического соединения

Для цитирования: Скугорев А.В., Капитаненко Д.В. Деформационная обработка труднодеформируемых сплавов с памятью формы систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr // Труды ВИАМ. 2022. № 1 (107). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-14-25.

Scientific article

DEFORMATION TREATMENT OF HARD-TO-DEFORM Ni–Ti–Nb AND Ni–Ti–Nb–Zr SHAPE MEMORY ALLOYS

Alexander V. Skugorev¹, Denis V. Kapitanenko¹

¹NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract: The work is devoted to the study of the processes of hot and cold plastic deformation of hard-to-deform shape memory alloys of the Ni–Ti–Nb and Ni–Ti–Nb–Zr systems. The optimal modes of deformation treatment of these alloys, which ensure the production of semi-finished products without surface defects, have been determined. Investigations of the mechanical properties of hot-deformed and cold-deformed semi-finished products from alloys of the Ni–Ti–Nb and Ni–Ti–Nb–Zr systems have been carried out. It is shown that the selected treatment modes of these alloys provide a high level of mechanical properties of materials.

Keywords: shape memory alloys, hot deformation, pressing, drawing, mechanical properties, thermomechanical couplings

For citation: Skugorev A.V., Kapitanenko D.V. Deformation treatment of hard-to-deform Ni–Ti–Nb and Ni–Ti–Nb–Zr shape memory alloys. *Trudy VIAM*, 2022, no. 1 (107), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-1-14-25.

Введение

В гражданской авиационной технике сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) используют для изготовления приводов заслонок систем вентиляции и кондиционирования, в приводах бортовых самописцев и элементах пожарной сигнализации. В гидроавтоматике систем автоматического управления газотурбинного двигателя такие сплавы применяют при создании плотных и неразъемных соединений; также с помощью

муфт из сплавов с ЭПФ можно скреплять патрубки гидросистем. В данном случае используется следствие ЭПФ, когда при восстановлении исходной геометрической формы изделия и наличии противодействия (обжатие трубы или прутка) сплав способен генерировать значительные реактивные усилия.

Из известных материалов, обладающих ЭПФ, т. е. способностью восстанавливать исходную геометрическую форму при термическом воздействии, наибольшее распространение получил эквиатомный сплав системы Ni–Ti марки ТН-1 (монокелид титана). Для этого сплава характерна исключительно большая обратимая деформация (до 15 %), т. е. деформация, после которой возможен возврат к первоначальной геометрической форме в результате обратимого термоупругого мартенситного превращения. Кроме того, данный сплав обладает комплексом высоких механических характеристик и способен генерировать значительные реактивные напряжения (>200 МПа) при восстановлении исходной геометрической формы изделия. Рабочая температура монокелида титана типа ТН-1 зависит от химического состава и структуры сплава и находится в интервале 0–40 °С, из-за чего деформационное воздействие (предварительное формообразование изделия) приходится проводить в области температур ниже комнатной, что технологически весьма сложно.

Разработанные в 2000-х гг. опытные составы сплавов с ЭПФ на основе монокелида титана, дополнительно легированные ниобием и цирконием, позволяют сменить температурный диапазон восстановления формы в интервале 30–100 °С и, соответственно, проведение всех технологических операций в область положительных температур, что значительно сокращает трудоемкость использования сплавов для сборки систем гидроавтоматики современных и перспективных газотурбинных двигателей.

Однако сплавы на основе монокелида титана систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr являются труднодеформируемыми, обладают более низкой технологической пластичностью и обрабатываемостью резанием по сравнению со сплавом-прототипом марки ТН-1. Данная работа посвящена разработке технологий горячей и холодной деформации сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr, обеспечивающих получение полуфабрикатов сложной формы из этих сплавов для изготовления разъемных термомеханических соединений патрубков гидроавтоматики.

Работа выполнена в рамках реализации комплексных научных проблем 5.1. «Андронидные материалы, обладающие эффектом памяти формы» и 10.2. «Изотермическая деформация на воздухе нового поколения гетерофазных труднодеформируемых жаропрочных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1, 2].

Материалы и методы

Выплавку слитков из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr проводили в вакуумной индукционной печи УППФ-3 с применением чистых шихтовых материалов [3]. Для повышения чистоты сплавов по неметаллическим включениям осуществляли вакуумно-дуговой переплав исходных слитков на установке ALD VAR L200.

Исследование химического состава слитков из данных сплавов проводили методами атомно-эмиссионного анализа содержания основных легирующих элементов в сплаве и газового анализа содержания примесей (C, S, O, N, H).

Технологическую пластичность сплавов в литом состоянии определяли по результатам испытаний цилиндрических образцов на осадку при температурах от 600 до 1200 °С. Осадку образцов проводили на гидравлическом одноколонном прессе с усилием 25 тс, нагрев образцов – в камерной электропечи сопротивления. Нагрев и деформацию

образцов осуществляли в контейнере из жаропрочного никелевого сплава, исключая охлаждение образца в процессе испытания.

Обработку технологией горячей деформации сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr проводили методом прессования (экструзии) прутков круглого сечения, из которых с помощью механической обработки можно изготовить муфты патрубков гидроавтоматики, и методом объемной штамповки модельной заготовки патрубка гидроавтоматики, обеспечивающей получение детали со значительно более высоким коэффициентом использования материала.

Горячее прессование (экструзию) выполняли на гидравлическом прессе «Блисс» с максимальным усилием 1000 тс. Для прессования использовали специализированный прессовый инструмент из штамповой стали для горячей деформации, который перед деформацией нагревали в электрической камерной печи ПСКО 700/360.60-60 до температуры 400 °С. Нагрев литых заготовок из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr проводили в электрической камерной печи KS 800/37.

Для защиты литых заготовок от окисления в процессе деформации, а также снижения напряжений трения на поверхности контакта деформируемого материала и штампового инструмента перед нагревом на поверхность заготовок наносили защитное технологическое покрытие (ЗТП) марки ЭВТ-24 [4–6]. После нанесения ЗТП обеспечивали полное высыхание заготовок.

Обработку режимов получения модельной штампованной заготовки муфты патрубка гидроавтоматики методом изотермической штамповки проводили на специализированном гидравлическом прессе ПА2638 с усилием 630 тс, оснащенный индукционной установкой нагрева штампового инструмента УИДИН-250 (данный комплекс оборудования называется изотермическим прессом) [7–9]. В качестве исходной заготовки использовали мерные литые заготовки из сплава системы Ni–Ti–Nb плавки 13-108п диаметром 50₋₂ мм и высотой 70 мм. На поверхность заготовок перед нагревом наносили ЗТП марки ЭВТ-24. После нанесения покрытия обеспечивали полное высыхание заготовок. Нагрев заготовок проводили в камерной электропечи ПСКО 1250/640 50 80. Штамповый инструмент с помощью установки УИДИН-250 нагревали до температуры, равной температуре нагрева литых заготовок.

Обработку технологии холодной деформации сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr проводили методом волочения. Волочение прутков выполняли на цепном волочильном станке при комнатной температуре. Для лучшего удержания смазки в процессе холодного волочения на поверхность прутка наносили подсмазочное покрытие – натриевое жидкое стекло. После полного застывания жидкого стекла на поверхность прутков наносили смазочное покрытие – раствор смазочного графита марки ГС-1 в машинном масле.

Определение механических свойств (предела прочности и относительного удлинения) горячедеформированных и холодноедеформированных полуфабрикатов из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr проводили в соответствии с ГОСТ 1497–84.

Результаты и обсуждение

Благодаря использованию современных технологий выплавки [10, 11], рафинирования [12, 13] и вакуумно-дугового переплава слитков из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr удалось добиться стабильности химического состава слитков по основным легирующим элементам в пределах ±0,2 % (по массе) и получить низкое содержание примесей в сплавах. Содержание углерода, серы и газовых примесей в слитках приведено в табл. 1.

Таблица 1

Содержание примесей в слитках из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr

Сплав	Содержание элементов, % (по массе)				
	C	S	O	N	H
Ni–Ti–Nb	0,065–0,072	0,0009–0,0014	0,047–0,050	0,0042–0,0076	0,0014–0,0023
Ni–Ti–Nb–Zr	0,060–0,082	0,0009–0,0011	0,045–0,048	0,0053–0,0060	0,0018–0,0021

Из выплавленных слитков изготовлены цилиндрические образцы диаметром 15 мм и высотой 20 мм в количестве 200 шт. (по 100 шт. для каждого сплава); продольная ось образцов совпадала с продольной осью слитков. Определение допустимой степени деформации образцов при осадке на прессе проводили в интервале температур от 600 до 1200 °С, соответствующем интервалу температур горячей деформации сплавов на основе никеля и титана. Максимально допустимую деформацию материала при определенной температуре определяли как максимальное значение степени деформации образца, при которой не происходит его макроразрушения (появления на боковой поверхности образца трещин или полного разрушения образца). На рис. 1 представлена диаграмма зависимости максимально допустимой степени деформации при сжатии образцов из исследуемых сплавов от температуры деформации.

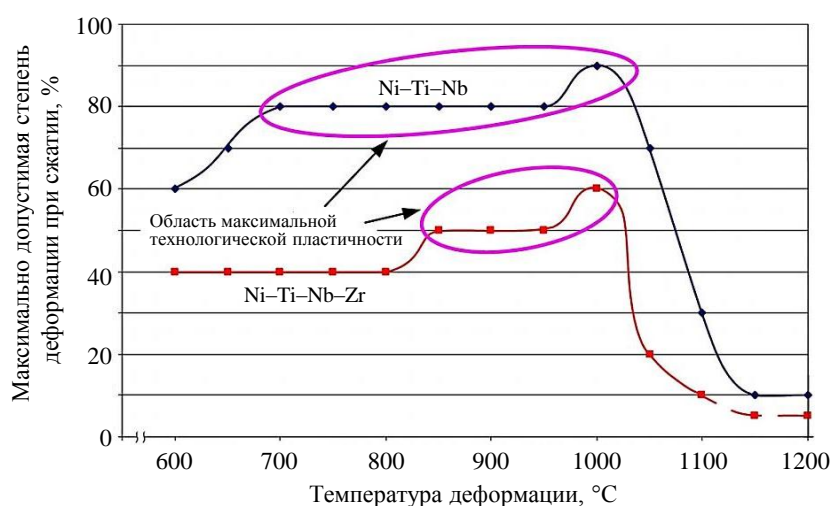


Рис. 1. Технологическая пластичность сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr в литом состоянии

Анализ результатов исследований показал, что четырехкомпонентный сплав системы Ni–Ti–Nb–Zr обладает более низкой технологической пластичностью при обработке давлением, чем трехкомпонентный сплав системы Ni–Ti–Nb. Сплав системы Ni–Ti–Nb имеет высокую технологическую пластичность при температурах от 700 до 1000 °С, а сплав системы Ni–Ti–Nb–Zr обладает сравнительно низкой технологической пластичностью, удовлетворительные значения которой находятся в интервале температур от 850 до 1000 °С.

*Отработка технологии прессования (экструзии) прутков
из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr*

Выбор параметров горячей деформации слитков из исследуемых сплавов проводили с учетом результатов компьютерного моделирования процессов деформации

в программном комплексе QForm, широко используемом при разработке технологий деформационной обработки специальных сталей и сплавов [14–16]. С помощью компьютерного моделирования произведена оценка изменения температуры заготовки вследствие ее охлаждения при контакте с деформирующим инструментом и разогрева при пластической деформации.

Оценку изменения температуры заготовки при прессовании осуществляли в зависимости от ее температуры нагрева перед деформацией и коэффициента вытяжки при прессовании μ , который определяли по формуле

$$\mu = \frac{D^2}{d^2} \approx \frac{D^2}{d_M^2},$$

где D – диаметр исходной заготовки, мм; d – диаметр заготовки после прессования, мм; d_M – диаметр матрицы, мм.

Выбор исходных параметров для моделирования обусловлен геометрическими формами заготовки и существующего штампового инструмента, техническими характеристиками используемого пресса и результатами исследования технологической пластичности сплавов. Используемые для расчета диаметры матрицы 10, 15, 23 и 30 мм соответствуют коэффициентам вытяжки: 30,2; 13,4; 5,7 и 3,4. По результатам компьютерного моделирования процесса экструзии слитка анализировали температурное поле заготовки до и после прессования (рис. 2).

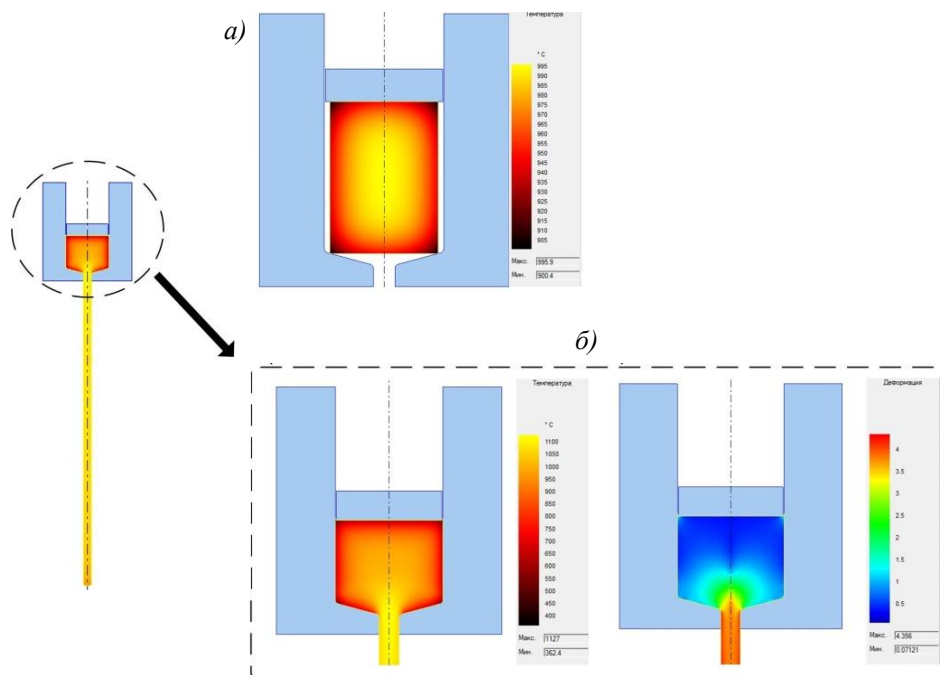


Рис. 2. Температурное поле заготовки после охлаждения на воздухе и в штампе (а) и после деформации (б) (справа – поле интенсивности деформации)

Результаты компьютерного моделирования показали, что исследуемые сплавы в процессе горячего прессования (экструзии) подвергаются значительному деформационному разогреву. Построен график зависимости максимальной температуры заготовки в процессе прессования (экструзии) от начальной температуры заготовки и коэффициента вытяжки при прессовании (рис. 3).

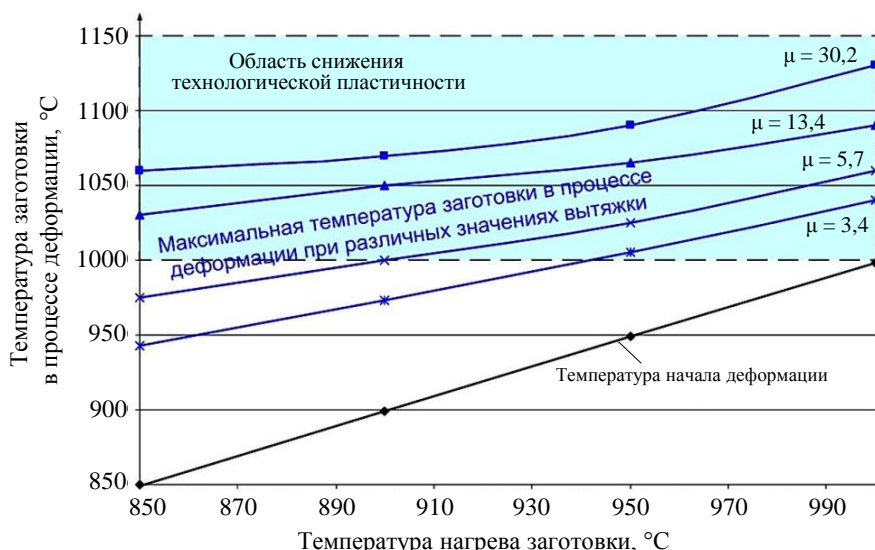


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры заготовки в процессе деформации от температуры ее нагрева и коэффициента вытяжки при прессовании

В соответствии с результатами компьютерного моделирования выбраны основные параметры прессования (экструзии) прутков круглого сечения из труднодеформируемых сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr с ЭПФ. В результате опытного прессования получены прутки диаметром 23 мм, структура которых не имеет трещин, плен, зажимов, расслоений и пустот. Полученные прутки пригодны для дальнейшей обработки технологии холодной деформации исследуемых материалов. На рис. 4 представлен внешний вид прессованных прутков, а также их макро- и микроструктура после прессования.

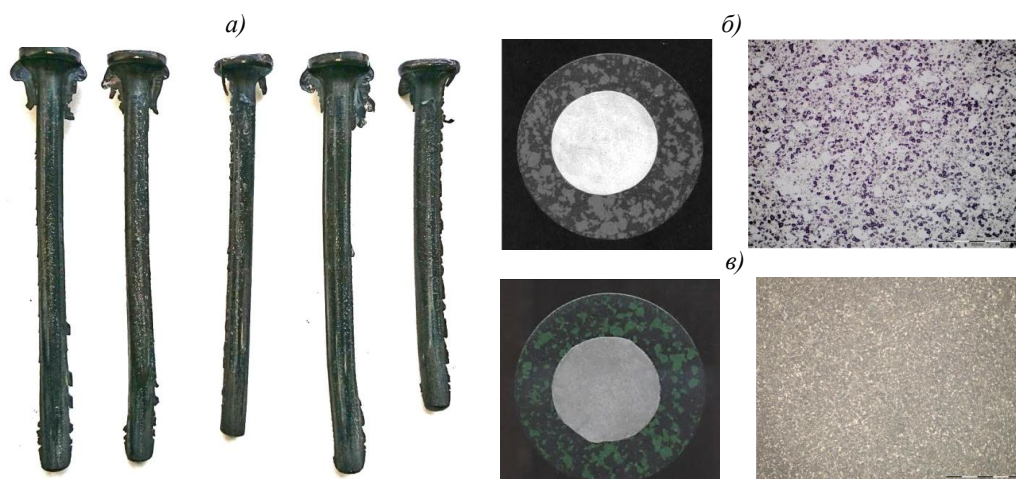


Рис. 4. Внешний вид (а), а также макро- и микроструктура прессованных прутков из сплавов систем Ni–Ti–Nb (б) и Ni–Ti–Nb–Zr (в)

Обработка технологии получения заготовки патрубка гидроавтоматики методом изотермической штамповки на воздухе

Для получения заготовок муфтовых соединений патрубков гидроавтоматики предложена горячая объемная штамповка заготовки муфты в условиях, близких к изотермическим. Методами компьютерного моделирования проведена оценка изменения температуры заготовки в процессе деформации. В связи с тем, что скорость хода

рабочего инструмента при штамповке на изотермических прессах в 7–10 раз меньше скорости хода рабочего инструмента при прессовании, повышение температуры заготовки (>1000 °С) наблюдают только при достаточно высокой степени деформации (64 %) заготовки (рис. 5). Таким образом, штамповку заготовки муфты патрубка гидроавтоматики можно проводить при температурах, близких к предельным температурам нагрева штампового инструмента на изотермических прессах.

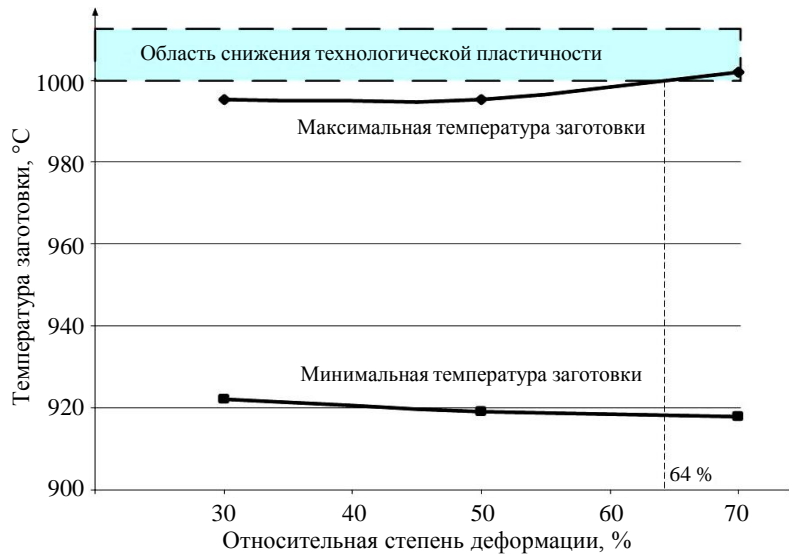


Рис. 5. Зависимость температуры заготовки от степени деформации при осадке в изотермических условиях (температуры нагрева заготовки и штампов равны)

По разработанной технологической схеме получены штампованные заготовки муфты патрубка гидроавтоматики (рис. 6), макроструктура которых не имеет трещин, плен, зажимов, расслоений и пустот.

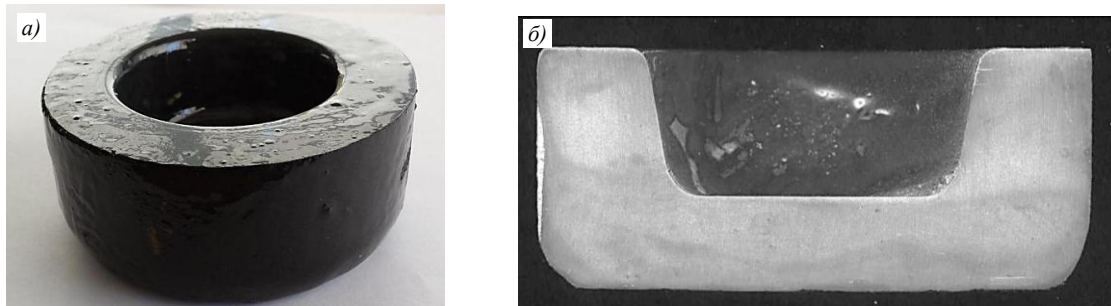


Рис. 6. Внешний вид (а) и макроструктура (б) штампованных заготовок из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr

Обработка технологии холодной деформации сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr

Получение прутков круглого сечения диаметром <20 мм осуществляли путем холодного волочения механически обработанных прессованных прутков. Прессованные прутки из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr номинальным диаметром 23 мм подвергали токарной обработке до диаметра 20 мм с полным удалением с их поверхности окалины и остатков ЗТП. Волочение прутков проводили путем однократного протягивания через фильеру. После каждого прохода волочения визуально контролировали состояние поверхности прутков. Для каждого перехода

волочения определяли количественные показатели деформации материала: коэффициент вытяжки и относительную степень деформации.

Коэффициент вытяжки определяли по формуле

$$\mu = \frac{d_0^2}{d_k^2},$$

где d_0 и d_k – диаметры прутка до и после волочения соответственно, мм.

Относительную степень деформации определяли по формуле

$$\varepsilon = \frac{(d_0^2 - d_k^2)}{d_0^2} \cdot 100 \%$$

На рис. 7 представлена схема отработки режимов волочения прутков из сплава системы Ni–Ti–Nb.

За первые два перехода волочения удалось получить прутки диаметром 17 мм без поверхностных дефектов (трещин и разрывов). Суммарная степень деформации составила 27,7 %. Далее проведена смягчающая термическая обработка. Режим термической обработки сплава системы Ni–Ti–Nb выбран по данным, представленным в работе [17]. После закалки прутки подвергали пескоструйной обработке для удаления окалины и последующего волочения. Волочение закаленного прутка проведено за три перехода. Получение прутка без поверхностных дефектов обеспечивается волочением с суммарной степенью деформации 25,2 мм. На полученных в ходе отработки режимов волочения прутках из сплава системы Ni–Ti–Nb диаметром 14,7 мм определяли механические свойства материала.

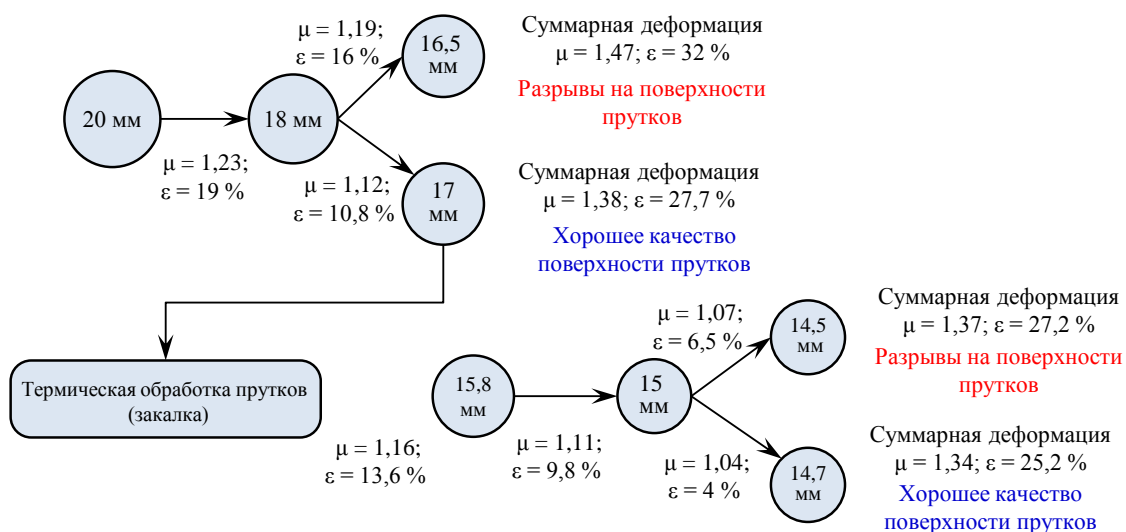


Рис. 7. Схема отработки режимов волочения прутков из сплава системы Ni–Ti–Nb

По аналогичному алгоритму проведена отработка режимов волочения прутков из сплава системы Ni–Ti–Nb–Zr (рис. 8).

По сравнению со сплавом системы Ni–Ti–Nb четырехкомпонентный сплав системы Ni–Ti–Nb–Zr обладает более низкой технологической пластичностью при холодной деформации волочением. Максимальная степень деформации до проведения смягчающей термической обработки для исследуемого сплава не превышает 20 %. Режим смягчающей термической обработки (закалки) сплава системы Ni–Ti–Nb–Zr выбран по данным, представленным в работе [17]. По результатам отработки режимов волочения

прутков из сплава системы Ni–Ti–Nb–Zr за четыре перехода получены прутки диаметром 16 мм, используемые для определения механических свойств материала.

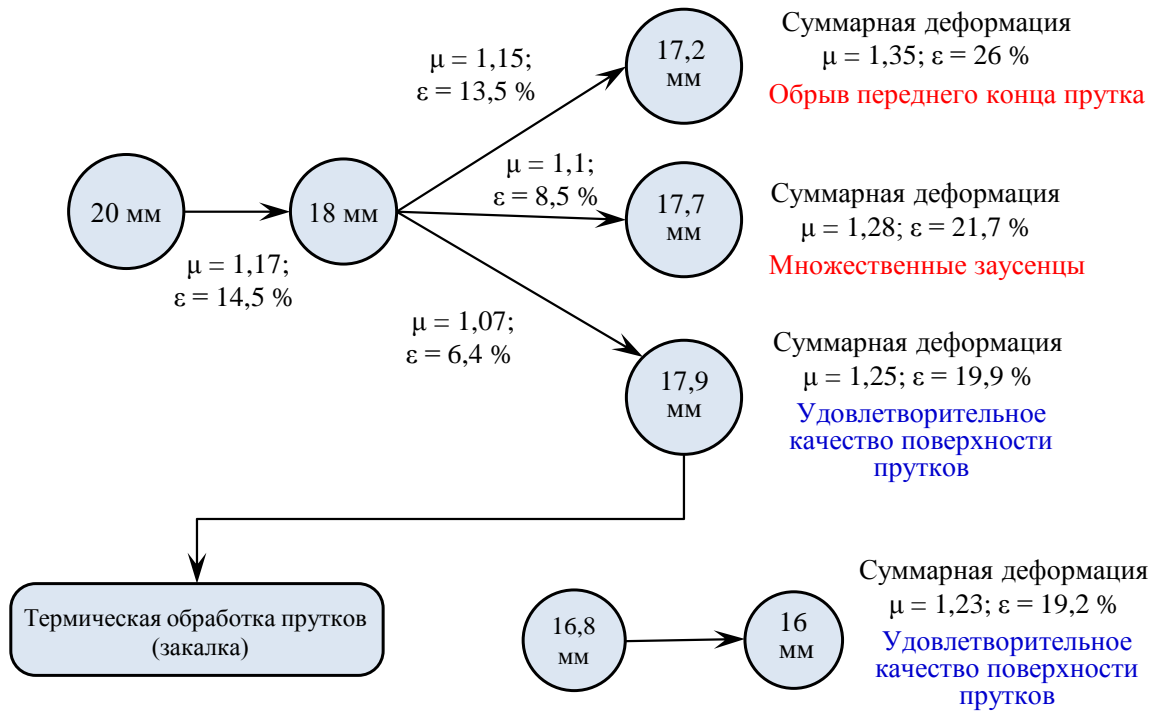


Рис. 8. Схема отработки режимов волочения прутков из сплава системы Ni–Ti–Nb–Zr

Результаты исследования макро- и микроструктуры волоченых прутков из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr (рис. 9) показали, что после термической обработки (закалки) структура прутков не содержит трещин, расслоений, пустот и равномерна по всей площади шлифов.

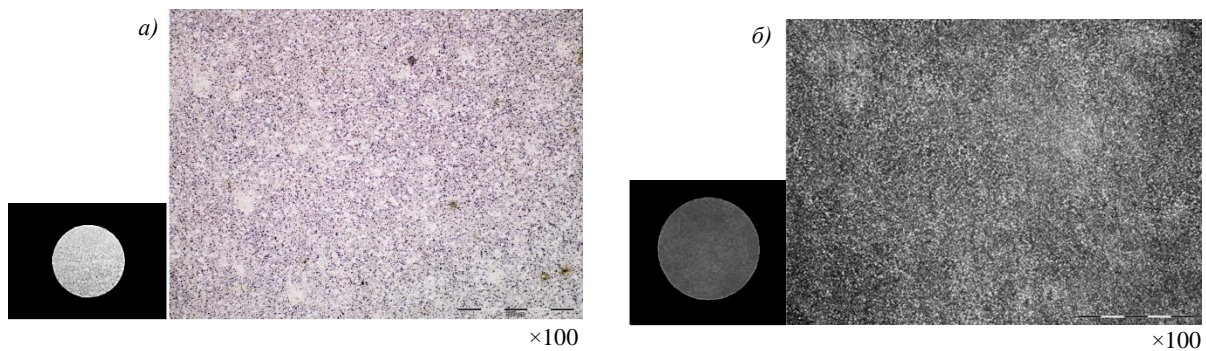


Рис. 9. Макро- и микроструктура холоднореформированных прутков из сплавов систем Ni–Ti–Nb (а) и Ni–Ti–Nb–Zr (б)

Механические свойства полуфабрикатов из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr

Прессованные и холоднореформированные (волоченые) прутки закаливали по режиму, выбранному по данным, представленным в работе [17]. В табл. 2 приведены результаты определения механических свойств горячедеформированных и холоднореформированных полуфабрикатов в закаленном состоянии.

Таблица 2

**Механические свойства полуфабрикатов в закаленном состоянии
из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr при температуре 20 °С**

Сплав	Вид полуфабриката	Предел текучести при растяжении, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
Ni–Ti–Nb	Прессованный пруток диаметром 23 мм	460–475	760–800	17,5–23,5
	Волоочный пруток диаметром 14,7 мм	460–485	750–790	15,5–19,5
Ni–Ti–Nb–Zr	Прессованный пруток диаметром 23 мм	215–225	930–990	16,5–21,5
	Волоочный пруток диаметром 16 мм	335–350	970–990	20,5–22,5

Результаты испытаний показали, что сплав системы Ni–Ti–Nb–Zr обладает большими прочностью и деформационным упрочнением, чем сплав системы Ni–Ti–Nb. Характеристики пластичности материалов позволяют проводить холодную деформацию образцов и деталей для последующей реализации ЭПФ.

Заключения

Проведены исследования технологической пластичности сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr в литом состоянии. По результатам компьютерного моделирования определены температурные интервалы горячей деформации труднодеформируемых сплавов с ЭПФ, обеспечивающие проведение пластической деформации в области максимальной технологической пластичности материалов и предотвращающие коррозионное растрескивание материала при деформации.

Экспериментально отработаны режимы горячей и холодной деформации труднодеформируемых сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr при операциях прессования (экструзии), изотермической штамповки на воздухе заготовки муфты патрубка гидроавтоматики и волочения прутков. Определены режимы деформации, обеспечивающие получение равномерной макро- и микроструктуры деформированных полуфабрикатов без трещин, расслоений, пустот, а также равномерных по всей площади шлифов.

Проведены исследования механических свойств горячедеформированных и холоднодеформированных полуфабрикатов из сплавов систем Ni–Ti–Nb и Ni–Ti–Nb–Zr. Установлено, что полуфабрикаты после термической обработки обладают высокими прочностными свойствами. Характеристики пластичности материалов позволяют проводить холодную деформацию образцов и деталей для последующей реализации ЭПФ.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
2. Каблов Е.Н. Маркетинг материаловедения, авиастроения и промышленности: настоящее и будущее // Директор по маркетингу и сбыту. 2017. № 5–6. С. 40–44.
3. Щербаков А.И., Мосолов А.Н., Калицев В.А. Производство бериллийсодержащей стали 32X13N6K3M2БДЛТ-ВИ (ВНС32-ВИ) // Материаловедение. 2017. № 4. С. 17–21.
4. Денисова В.С., Малинина Г.А., Власова О.В., Виноградова А.Ю. Влияние добавок тетраборида кремния на свойства жаростойких покрытий для защиты жаропрочных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2019. № 2. С. 68–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-68-73.

5. Розененкова В.А., Солнцев С.С., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Стеклокерамические композиционные защитные технологические покрытия для термомеханической обработки интерметаллидных сплавов // *Стекло и керамика*. 2016. № 10. С. 32–36.
6. Солнцев С.С., Денисова В.С. Реакционно отверждаемые композиционные покрытия и стекла // *Стекло и керамика*. 2019. № 4. С. 9–14.
7. Пономаренко Д.А., Летников М.Н., Скугорев А.В., Сидоров С.А. Использование специализированных изотермических прессов дляковки заготовок дисков турбины из труднодеформируемых жаропрочных сплавов // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2018. № 3. С. 19–25.
8. Бакрадзе М.М., Ломберг Б.С., Сидоров С.А., Бубнов М.В. Изготовление крупногабаритных штамповок дисков ГТД из слитков промышленного производства Ø320 мм сплава ЭК151-ИД // *Труды ВИАМ*. 2017. № 6 (54). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-2-2.
9. Моисеев Н.В., Некрасов Б.Р., Летникова Е.Ю., Выдумкина С.В. Штамповые материалы для высокотемпературной изотермической деформации на воздухе // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2017. № 7. С. 25–30.
10. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г. Металлургические основы обеспечения высокого качества монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-s-55-71.
11. Каблов Е.Н., Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г., Ригин В.Е. Ресурсосберегающие технологии выплавки перспективных литейных и деформируемых супержаропрочных сплавов с учетом переработки всех видов отходов // *Электротехнология*. 2016. № 9. С. 30–41.
12. Сидоров В.В., Мин П.Г., Каблов Д.Е. Десульфурация монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов при плавке в вакууме // *Металлург*. 2017. № 5. С. 57–62.
13. Сидоров В.В., Каблов Д.Е., Мин П.Г., Вадеев В.Е. Рафинирование сложнолегированного никелевого сплава ЖС32-ВИ от примесей кремния и фосфора путем однонаправленного затвердевания расплава при малых скоростях перемещения фронта кристаллизации // *Технология металлов*. 2016. № 3. С. 2–7.
14. Шпагин А.С., Кучеряев В.В., Бубнов М.В. Компьютерное моделирование процессов термомеханической обработки жаропрочных никелевых сплавов ВЖ175 и ЭП742 // *Труды ВИАМ*. 2019. № 8 (80). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 18.08.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-27-35.
15. Бакрадзе М.М., Скугорев А.В., Кучеряев В.В., Бубнов М.В. Компьютерное моделирование технологических процессов обработки металлов давлением как инструмент разработки новых технологий // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 175–185. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-s-175-185.
16. Гладков Ю.А., Каневский С.С. Моделирование прессования алюминиевых профилей в новой версии программы QForm Extrusion VX: совместная деформационная задача // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. 2016. № 11. С. 41–48.
17. Боровков Д.В. Структура, мартенситные превращения и функциональные свойства сплавов с памятью формы на основе Ti–Ni–Nb с широким мартенситным гистерезисом: дис. ... канд. техн. наук. М., 2006. 122 с.

Reference

1. Kablov E.N. What to make the future of? New generation materials, technologies for their creation and processing - the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
2. Kablov E.N. Marketing of materials science, aircraft construction and industry: present and future. *Direktor po marketingu i sbytu*, 2017, no. 5-6, pp. 40–44.
3. Shcherbakov A.I., Mosolov A.N., Kalitsev V.A. Production of beryllium-containing steel 32Kh13N6K3M2BDLT-VI (VNS32-VI). *Materialovedenie*, 2017, no. 4, pp. 17–21.
4. Denisova V.S., Malinina G.A., Vlasova O.V., Vinogradova A.Yu. The influence of silicon tetra-boride additives on properties of heat-resistant coatings for nickel alloys protection. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 68–73. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-68-73.

5. Rosenenkova V.A., Solntsev S.S., Mironova N.A., Gavrilov S.V. Glass-ceramic composite protective technological coatings for thermomechanical processing of intermetallic alloys. *Steklo i keramika*, 2016, no. 10, pp. 32–36.
6. Solntsev S.S., Denisova V.S. Reaction-hardened composite coatings and glass. *Steklo i keramika*, 2019, no. 4, pp. 9–14.
7. Ponomarenko D.A., Letnikov M.N., Skugorev A.V., Sidorov S.A. The use of specialized isothermal presses for forging blanks of turbine disks from hard-to-deform heat-resistant alloys. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2018, no. 3, pp. 19–25.
8. Bakradze M.M., Lomberg B.S., Sidorov S.A., Bubnov M.V. Method of large-sized deformed turbine discs manufacturing from EK151-ID industrial ingots with limited diameter (320 mm). *Trudy VIAM*, 2017, no. 6 (54), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-6-2-2.
9. Moiseev N.V., Nekrasov B.R., Letnikova E.Yu., Vydumkina S.V. Stamping materials for high-temperature isothermal deformation in air. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2017, no. 7, pp. 25–30.
10. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Min P.G. The metallurgical fundamentals for high quality maintenance of single crystal heat-resistant nickel alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 55–71. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-55-71.
11. Kablov E.N., Sidorov V.V., Kablov D.E., Min P.G., Rigin V.E. Resource-saving technologies for the smelting of promising casting and wrought superheat-resistant alloys taking into account the processing of all types of waste. *Elektrometallurgiya*, 2016, no. 9, pp. 30–41.
12. Sidorov V.V., Min P.G., Kablov D.E. Desulfurization of monocrystalline heat-resistant nickel alloys during melting in vacuum. *Metallurg*, 2017, no. 5, pp. 57–62.
13. Sidorov V.V., Kablov D.E., Min P.G., Vadeev V.E. Refining of complex alloyed nickel alloy ZhS32-VI from silicon and phosphorus impurities by means of unidirectional solidification of the melt at low speeds of movement of the crystallization front. *Tekhnologiya metallov*, 2016, no. 3, pp. 2–7.
14. Shpagin A.S., Kucheryaev V.V., Bubnov M.V. Computer simulation of thermomechanical processing of heat-resistant nickel alloys VZh175 and EP742. *Trudy VIAM*, 2019, No. 8 (80), paper no. 04. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: August 18, 2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-27-35.
15. Bakradze M.M., Skugorev A.V., Kucheryayev V.V., Bubnov M.V. Computer modeling of technological metal forming processes as effective instrument for development of new technologies. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2017, no. S, pp. 175–185. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-175-185.
16. Gladkov Yu.A., Kanevsky S.S. Modeling of extrusion of aluminum profiles in the new version of the QForm Extrusion VX program: a joint deformation problem. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniyem*, 2016, no. 11, pp. 41–48.
17. Borovkov D.V. *Structure, martensitic transformations and functional properties of shape memory alloys based on Ti – Ni – Nb with wide martensitic hysteresis*: thesis, Cand. tech. sciences. Moscow, 2006, 122 p.

Информация об авторах

Скугорев Александр Викторович, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Капитаненко Денис Владимирович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Alexander V. Skugorev, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Denis V. Kapitanenko, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 15.09.2021; одобрена после рецензирования 25.10.2021; принята к публикации 25.10.2021.

The article was submitted 15.09.2021; approved after reviewing 25.10.2021; accepted for publication 25.10.2021.