

Сведения о выполненных работах в 2020 году
по проекту «Исследование термомеханической стабильности сверхэластичности
и разработка способов ее повышения в высокопрочных монокристаллах
никелида титана с содержанием Ni от 50.6 до 52.0 ат. %»,
поддержанному Российским научным фондом
Соглашение № 18-19-00298

Руководитель Тимофеева Екатерина Евгеньевна, канд. физ.-мат. наук

Впервые проведено исследование влияния количества вариантов крупных частиц Ti_3Ni_4 ($d > 400$ нм) на функциональные и механические свойства, их циклическую и термомеханическую стабильность в высоконикелевых монокристаллах $TiNi$ ($50,6 \text{ ат.}\% \leq CNi < 52 \text{ ат.}\%$).

Экспериментально получено, что при выделении крупных частиц Ti_3Ni_4 четырех вариантов температурный интервал развития СЭ слабо зависит от содержания никеля, в отличие от монокристаллов с одним вариантом частиц. В монокристаллах, содержащих четыре варианта частиц, СЭ проявляется в широком интервале температур от ~ 150 К в $Ti-51,2 \text{ ат.}\% Ni$ до 200 К в $Ti-51,7 \text{ ат.}\% Ni$. В монокристаллах с одним вариантом крупных частиц Ti_3Ni_4 увеличение CNi с 51,2 ат.% до 51,7 ат.% приводит к расширению интервала развития СЭ в 10 раз от 20 К до 200 К. Такое поведение интерпретируется низкими прочностными свойствами в монокристаллах с одним вариантом крупных частиц Ti_3Ni_4 . Разработаны рекомендации для получения высокотемпературной СЭ в высоконикелевых монокристаллах $TiNi$ с одним и четырьмя вариантами крупных частиц Ti_3Ni_4 . Впервые обнаружено условие для развития высокотемпературной СЭ до 498 К в монокристаллах $TiNi$ с одним вариантом крупных частиц Ti_3Ni_4 , которое заключается в выборе химического состава с большим содержанием никеля 51,7 ат.% и выше. При более низком содержании никеля 51,0-51,5 ат.% для получения высокотемпературной СЭ и высоких прочностных свойств целесообразнее проводить старение в свободном состоянии, чем под нагрузкой.

Экспериментально установлено, что термомеханическая и циклическая стабильность ЭПФ и СЭ определяется числом вариантов крупных частиц Ti_3Ni_4 и содержанием никеля в [001]-монокристаллах $TiNi$ ($50,6 \text{ ат.}\% \leq CNi < 52 \text{ ат.}\%$) при деформации сжатием.

Состаренные без нагрузки монокристаллы проявляют более высокую термомеханическую стабильность, чем монокристаллы, состаренные под нагрузкой. Это утверждение справедливо для всех исследованных химических составов $CNi = 51,2-51,7 \text{ ат.}\%$, содержащих крупные частицы Ti_3Ni_4 . С ростом содержания никеля термомеханическая и циклическая стабильность СЭ увеличиваются в монокристаллах, состаренных под нагрузкой и в свободном состоянии. Наиболее стабильными по отношению к испытаниям при высокой температуре и напряжениях являются монокристаллы $Ti-51,5 \text{ ат.}\% Ni$ с четырьмя вариантами крупных частиц Ti_3Ni_4 и монокристаллы $Ti-51,7 \text{ ат.}\% Ni$ с одним вариантом частиц Ti_3Ni_4 .

На основе проведенного анализа экспериментальных данных, полученных за 2018-2020 гг., выяснены зависимости прочностных свойств В2-фазы и интервала развития СЭ от химического состава (содержания никеля) монокристаллов TiNi ($50,6 \text{ ат.}\% \leq \text{CNi} \leq 52 \text{ ат.}\%$). Для каждой разработанной в проекте микроструктуры гетерофазных монокристаллов увеличение никеля приводит к увеличению прочностных свойств и расширению интервала развития СЭ. Высокие прочностные свойства и наиболее широкие интервалы развития СЭ наблюдаются, во-первых, в монокристаллах Ti-50,6 ат. % Ni с наноразмерными частицами Ti₃Ni₄ с $d < 30 \text{ нм}$ (2100 МПа и $253 \div 423 \text{ К}$). Во-вторых, в монокристаллах TiNi при $\text{CNi} = 51,2\text{-}51,8 \text{ ат.}\%$ с крупными ($d > 400 \text{ нм}$) частицами Ti₃Ni₄ четырех вариантов (1600-2100 МПа и $203 \div 460 \text{ К}$). В-третьих, в монокристаллах Ti-51,5 ат.% Ni с бимодальным распределением частиц Ti₃Ni₄: между крупными частицами находятся наноразмерные частицы (до 2400 МПа и $270 \div 460 \text{ К}$ и выше).

Определены оптимальные параметры для получения стабильной к термомеханическим выдержкам СЭ. Для этого необходимо высокое исходное содержание никеля 51,2-51,8 ат.% в монокристаллах, которые будут подвергнуты высокотемпературному старению при 823 К для выделения крупных частиц Ti₃Ni₄ ($d > 400 \text{ нм}$). Если содержание никеля находится в пределах 51,2–51,5 ат.% необходимым условием является формирование бимодального распределения частиц Ti₃Ni₄, где между крупными частицами ($d > 400 \text{ нм}$) находятся наноразмерные частицы ($d < 30 \text{ нм}$). Выделения наноразмерных частиц возможно добиться за счет дополнительного старения при 673 К или за счет медленного охлаждения после старения при 823 К.