

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

Национальный исследовательский Томский государственный университет
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Болгарская Академия наук
ООО «Научно исследовательское предприятие «Лазерные технологии»

ИННОВАТИКА-2019

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ

**XV Международной школы-конференции студентов,
аспирантов и молодых ученых
25–27 апреля 2019 г.
г. Томск, Россия**

Под редакцией А.Н. Солдатов, С.Л. Минькова

Scientific & Technical Translations



ИЗДАТЕЛЬСТВО

Томск – 2019

РАЗРУШЕНИЕ НИКЕЛИДА ТИТАНА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИНТЕНСИВНЫХ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

А.И. Круглов¹, Т.Ю. Малеткина^{1,2}, А.Б. Марков³, Е.В. Яковлев³

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет

²Томский государственный архитектурно-строительный университет

³Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

DESTRUCTION OF TITANIUM NICKELIDE UNDER THE STRESS OF INTENSIVE SHOCK LOADS

A.I. Kruglov¹, T.Y. Maletkina^{1,2}, A.B. Markov³, E.V. Yakovlev³

¹National Research Tomsk State University

²Tomsk State University of Architecture and Construction

³Institute of High Current Electronics SB RAS

The results of experimental and theoretical research of shock-wave processes and spall fracture of Ti-Ni alloy under the impact of nanosecond relativistic high-current electron beam are reported. Features and structural-scale levels of spall fracture for structures with different thickness have been investigated.

Keywords: Ti-Ni alloy, spall fracture, shock-wave, electron beam, martensitic transformations

В последнее время благодаря развитию высокоэнергетических методов воздействия на материалы для исследования ударно-волновых процессов и откольного разрушения в материалах стали использовать ударные волны, генерируемые воздействием лазерного излучения и релятивистского сильноточного электронного пучка.

В настоящей работе представлены результаты экспериментально-теоретического исследования ударно-волновых процессов и откольного разрушения в никелида титана при воздействии концентрированных потоков энергии. Облучение релятивистским сильноточным электронным пучком с длительностью импульса 50 нс осуществляли на ускорителе «СИНУС-7» в Институте сильноточной электроники СО РАН. Мишени для облучения толщиной от 2 до 11 мм были изготовлены из никелида титана эквиатомного состава. Как результат предшествующей термомеханической обработки в сплаве присутствовали частицы производственной и вторичных фаз типа $Ti_4Ni_2(O,C,N)$, Ti_2Ni , $TiNi_3$. В исходном состоянии до облучения сплав находился в состоянии (B2+R+B19'). По результатам рентгенографического исследования массовое содержание фаз мартенсита B19' составляло 36 %. После облучения доля регистрируемо-

го мартенсита В19' уменьшилась примерно в 2 раза, а доля фаз R и B2 возросла.

Исследование поверхностей образцов после облучения показало, что на облучаемой лицевой поверхности образцов образуется лунка диаметром 7–8 мм и глубиной 1,0–1,5 мм. На образцах толщиной от 2 до 6 мм с тыльной стороны происходит откольное разрушение с полным отрывом отколотого слоя (рис. 1). На образцах толщиной от 7 до 11 мм отколотого слоя нет.

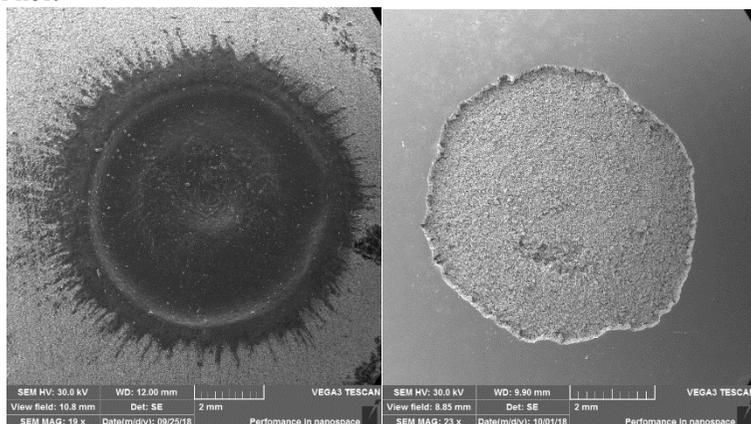


Рис. 1 Фотография поверхностей лицевого кратера и тыльного откола образца сплава $Ti_{50}Ni_{50}$

В зоне откола сплава у всех образцов разрушение по структурному признаку является вязко-хрупким с ямками вязкого отрыва и фасетками квазискола. Поверхность разрушения преимущественно соответствует поверхности разрушения B2-фазы и состоит из ямок отрыва. На дне и стенках ямочных фасеток в большом количестве наблюдаются мелкие поры. Участки квазискола представляют собой гребни рваной формы, которые являются местами дорыва (рис.2, а). Согласно работе [1], ямки такого типа (фасетки) формируются зарождением отдельных трещин, их концентрическим ростом и слиянием. Места дорыва образуются по границам этих ямок. Внутри отдельных фасеток видны ступеньки скола. Такая структура характерна для материалов, где возможности пластической деформации практически исчерпаны.

Компьютерное моделирование динамики ударной волны и откольного разрушения для мишени толщиной 5 мм показало, что при облучении наносекундным релятивистским сильноточным электронным пучком в материале генерируется ударная волна амплитудой 23 ГПа, которая достаточно быстро затухает и при достижении тыльной поверхности имеет амплитуду 11 ГПа. Далее, при отражении, напряжения меняют знак и становятся растягивающими, они приводят к генерации микротрещин, их росту и отколу слоя мишени. Согласно работе [2] в результате прохождения ударной волны подобной интенсивности по металлическому кристаллу в нем формируется ячеистая дислокационная структура с высокой плотностью дислокаций, которая увеличивается с ростом давления, а размер дислокационных ячеек при этом уменьшается. То есть при движении ударной волны сжатия и формировании волны разгрузки (растяжения) в материале идут процессы пластической деформации, как один из основных механизмов диссипации энергии. При этом в материале формируются множественные концентраторы напряжений, являющиеся причиной формирования микротрещин. Можно предположить, что высокая скорость ударных волн тормозит эволюцию дислокационной структуры и создает условия для достаточно равномерного распределения микротрещин, их быстрого роста и слияния.

Следует также отметить, что после облучения в образцах сплава было отмечено уменьшение доли мартенсита В19'. На наш взгляд, в никелиде титана, находящемся в предмартенситном и мартенситном состояниях, реализуется еще один механизм диссипации энергии в виде прямых и обратных мартенситных превращений под действием ударно-волновой нагрузки и теплового фронта, распространяющегося вслед за ударной волной сжатия.

На поверхности разрушения присутствуют также в отдельных местах хрупко разрушенные частицы (рис.2, *b*) и вокруг них преобладает ручьевый характер разрушения. Анализ поверхностей шлифов показал, что частицы вторичной и производственной фаз расположены строчечно вдоль оси образца, то есть перпендикулярно поверхности откола, и являются источниками больших и мелких пор, расположение которых на поверхности шлифа также представлено как в виде цепочек вдоль оси образца.

Образцы сплава толщиной от 7 до 11 мм не претерпели откола. В таких образцах при прохождении ударной волны диссипация энергии более значительна, и на момент отражения амплитуда падающей волны уже не

достигает величины откольной прочности. Поверхность шлифов образцов, не претерпевших откола, имеет множество мелких пор, равномерно расположенных по всей поверхности шлифа, а также равномерно расположенные трещины в виде коротких глубоких хрупких разрывов, возможно, в области крупных включений производственной фазы $Ti_4Ni_2(O,N,C)$.

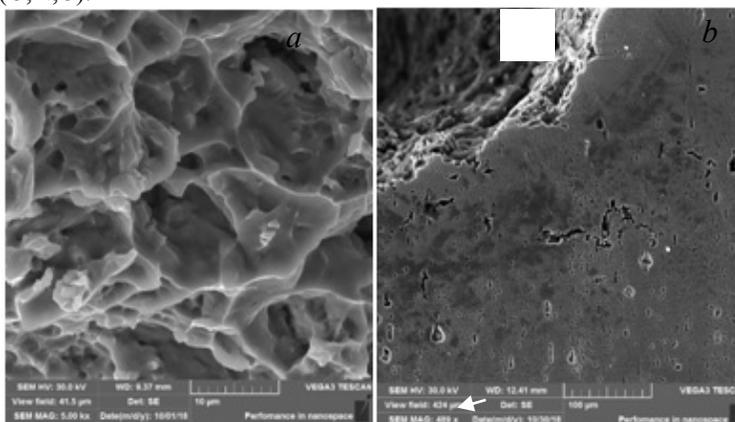


Рис. 2. Микрофотографии поверхности откола сплава (а) и поверхности шлифа (б) вблизи откола при разном увеличении

Таким образом, впервые получены экспериментальные данные о структурно-фазовом состоянии, поровой структуре в зоне откола и в продольном сечении образцов никелида титана, подвергнутых облучению наносекундным релятивистским сильноточным электронным пучком. Результаты данного исследования будут использованы при разработке научных основ и практических способов повышения ударной прочности этого класса сплавов, реализуемых при ударно-волновом нагружении.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ грант 18-48-700041р_а.

Литература

1. Энгель Л. и Клингель Г., Растровая электронная микроскопия. Разрушение // Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1986. 232 с.
2. Murr L.E.. Scripta Met. 12, 201 (1978).