

PACS: 81.40.-z

А.И. Коршунов, А.А. Смоляков, Т.Н. Кравченко, И.И. Каганова

ВЛИЯНИЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$

ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»
пр. Мира, 37, г. Саров Нижегородской обл., 607190, Россия
E-mail: alex.i.korshunov@gmail.com

Изучено влияние равноканального углового прессования (РКУП) на механические свойства сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$. Показано, что обработка приводит к измельчению зерен до 300 нм, повышению пределов текучести и прочности при снижении относительного удлинения.

Ключевые слова: бинарные сплавы, механические свойства, текстура, масштабный эффект

Бинарные сплавы TiNi относятся к материалам, в которых реализуется эффект памяти формы [1,2]. Для исследований был взят бинарный сплав $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ заэквипроцентного состава производства компании Intrinsic Devices, Inc (США).

Сплав был поставлен в форме горячекатаных прутков диаметром 25.4 mm. Для проведения РКУП была выбрана оснастка с диаметром каналов 20 mm, максимально близким к диаметру исходных прутков. Предварительно в 3 этапа при 500°C осуществляли редуцирование прутков с исходного диаметра 25.4 mm до диаметра каналов 20 mm. Перед РКУП заготовки закаливали (800°C, выдержка 1 h, вода) для гомогенизации и устранения термомеханической предыстории.

РКУП исходных, закаленных заготовок проводили при следующих параметрах: диаметр каналов – 20 mm, угол пересечения каналов – 110°, температура прессования – 450°C, маршрут прессования – B_C , количество проходов – 8. Внешний вид образцов после РКУП показан на рис. 1.



Рис. 1. Образец из сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ после РКУП

Структура. Микроструктура сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ в исходном, закаленном состоянии представлена на рис. 2. После закалки сплав находится в аустенитном состоянии (фаза $B2$). Зерна как в продольном, так и в поперечном сечениях имеют равноосную форму и средний размер $\sim 20 \mu m$.

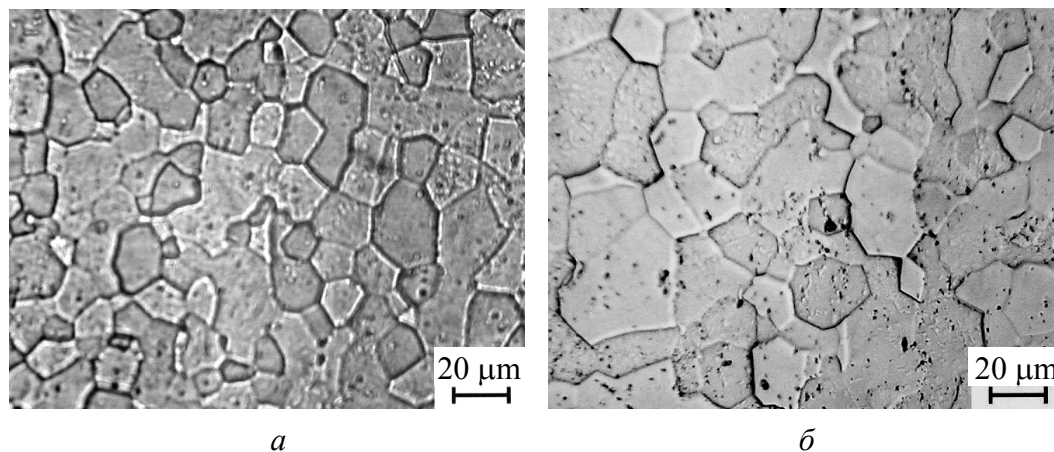


Рис. 2. Микроструктура сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ в исходном, закаленном состоянии: *a* – поперечное сечение, *б* – продольное. Оптическая металлография

По виду электронограмм сплав $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ после РКУП имеет аустенитную структуру $B2$ смешанного характера (рис. 3). В ней присутствуют как равноосные зерна с четкими большеугловыми границами, так и субзерна с неявно видимыми малоугловыми границами. В поперечном сечении зерна имеют средний размер 300 nm (рис. 3,*a*), общий интервал разброса размера зерна 100–550 nm. В продольном сечении наблюдается вытянутость зерен (рис. 3,*б*), средний размер зерен составляет 800 nm, коэффициент анизотропии формы зерен ~ 2.5 .

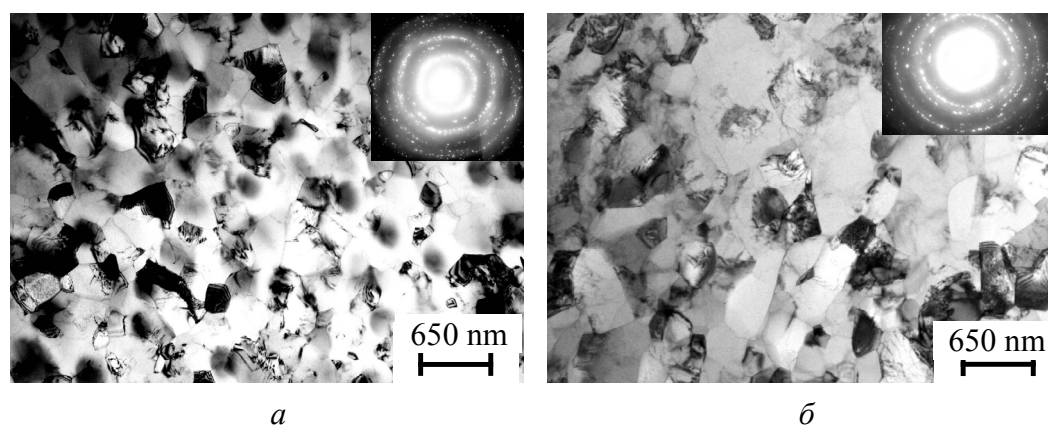


Рис. 3. Микроструктура сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ после РКУП: *a* – поперечное сечение, *б* – продольное. ПЭМ

Влияние РКУП на механические свойства. Механические свойства сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ в исходном, закаленном состоянии и после РКУП исследовали на микрообразцах $\varnothing 2 \text{ mm}$ с пятикратной начальной рабочей длиной. Образ-

цы были вырезаны вдоль оси заготовок. Испытания проводили при комнатной температуре и скорости деформации 10^{-3} s^{-1} . Результаты исследований представлены в табл. 1, условные диаграммы деформирования – на рис. 4.

Таблица 1

Механические свойства сплава $\text{Ti}_{49.4}\text{Ni}_{50.6}$ в исходном, закаленном состоянии и после РКУП

Состояние	σ_y	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ_5
	N/mm ²			%
Исходное, закаленное	188	502	824	27.3
РКУП, 8-BC	283	977	1010	7.5

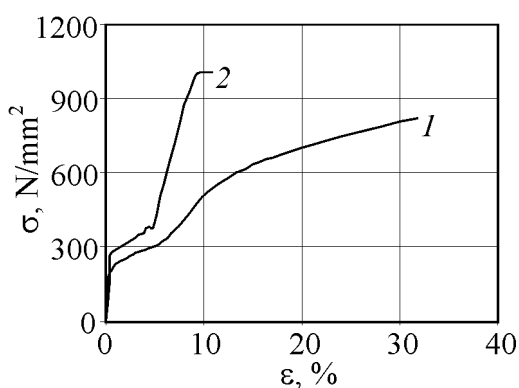


Рис. 4. Условные диаграммы деформирования сплава $\text{Ti}_{49.4}\text{Ni}_{50.6}$: 1 – исходное, закаленное состояние; 2 – РКУП, 8-BC

Восемь проходов РКУП сплава $\text{Ti}_{49.4}\text{Ni}_{50.6}$ позволили измельчить зерно примерно на два порядка и, как следствие [3], привели к повышению всех прочностных характеристик. Фазовый предел текучести увеличился на 50%, условный предел текучести – практически в 2 раза, предел прочности – более чем на 20%, а модуль упрочнения – более чем в два раза. Практически не изменилась величина площадки, соответствующая фазовому пределу текучести, но после РКУП в конце

площадки появился характерный зуб текучести. Как и для обычных конструкционных материалов [4], после РКУП для сплава $\text{Ti}_{49.4}\text{Ni}_{50.6}$ произошло значительное (более чем в 3 раза) снижение относительного удлинения.

Анизотропия после РКУП. Для исследования анизотропии сплава $\text{Ti}_{49.4}\text{Ni}_{50.6}$ после РКУП из одной заготовки были изготовлены цилиндрические микрообразцы $\varnothing 1.5 \text{ mm}$ с пятикратной рабочей длиной, ориентированные вдоль и поперек оси заготовки. Испытания проводили при комнатной температуре и скорости деформации 10^{-3} s^{-1} . Результаты исследований представлены в табл. 2, условные диаграммы деформирования – на рис. 5.

Таблица 2

Механические свойства сплава $\text{Ti}_{49.4}\text{Ni}_{50.6}$ после РКУП для разных направлений вырезки образцов

Направление вырезки образцов	σ_y	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ_5	ψ
	N/mm ²			%	
Вдоль оси заготовки	290	978	1060	8.0	19.2
Поперек оси заготовки	270	968	1080	8.7	19.4

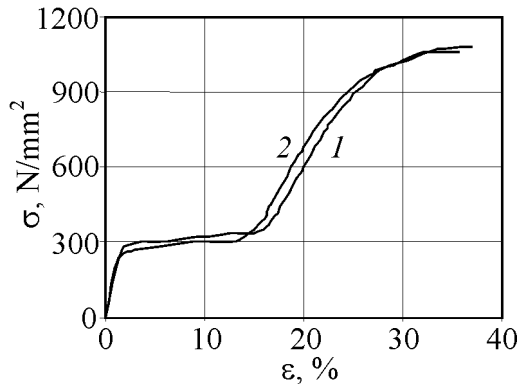


Рис. 5. Условные диаграммы деформирования сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ после РКУП: 1 – вдоль оси заготовки, 2 – поперек оси заготовки

Полученные результаты показывают, что анизотропия механических свойств при растяжении для сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ после РКУП полностью отсутствует. Свойства материала вдоль и поперек прутка практически одинаковы, небольшие различия укладываются в пределы внутривариационного разброса.

Масштабный эффект исследовали на пропорциональных, пятикратных образцах $\varnothing 1.5$ и 4 mm, вырезанных из одной заготовки в осевом направлении. Испытания проводили при комнатной температуре и

скорости деформации $10^{-3} s^{-1}$. Результаты исследований приведены в табл. 3, условные диаграммы деформирования – на рис. 6.

Таблица 3

Масштабный эффект механических свойств сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ после РКУП

Диаметр образца, mm	σ_y	$\sigma_{0.2}$	σ_b	δ_5	ψ
	N/mm ²			%	
1.5	310	987	1080	7.0	15.7
4	289	942	1010	11.7	10.8

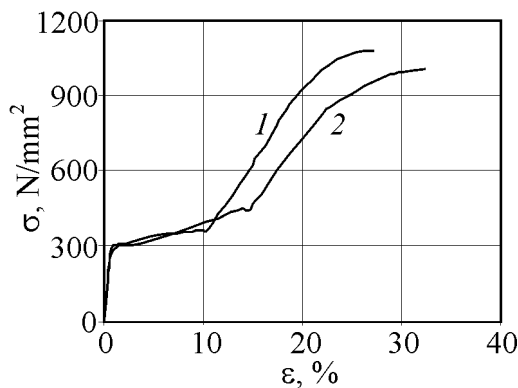


Рис. 6. Условные диаграммы деформирования сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ после РКУП: 1 – диаметр образца – 1.5 mm, 2 – 4 mm

Имеет место небольшой масштабный эффект для всех прочностных характеристик. Фазовый и условный пределы текучести, а также предел прочности для образцов с диаметром 1.5 mm выше на 5–7%, чем для образцов с диаметром 4 mm. Изменение характеристик пластичности более значительно. Для микрообразцов относительное удлинение после разрыва в полтора раза ниже, а относительное сужение в полтора раза выше, чем те же характеристики для стандартных образцов. Также для микрообразцов

примерно в полтора раза меньше, чем для стандартных, площадка, соответствующая фазовому пределу текучести. Модули упрочнения примерно одинаковы.

Влияние формы. Для исследования влияния формы были изготовлены плоские образцы с размерами рабочей части $1.6 \times 6.4 \times 31.8$ mm. Размеры

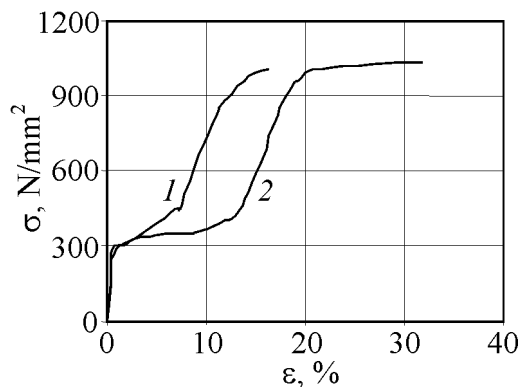


Рис. 7. Условные диаграммы деформирования сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ после РКУП: 1 – цилиндрический образец, 2 – плоский

образцов были выбраны так, чтобы объем их рабочей части и площадь поперечного сечения были примерно равны объему рабочей части и площади поперечного сечения цилиндрических образцов $\varnothing 4$ mm. Это позволяет исследовать только влияние формы без наложения масштабного эффекта. Для плоских образцов были получены следующие значения механических свойств: $\sigma_y = 265$ N/mm², $\sigma_{0.2} = 895$ N/mm², $\sigma_b = 1030$ N/mm², $\delta_5 = 18.0\%$. Сравнивая значения механических свойств со свойствами для цилиндрических образцов $\varnothing 4$ mm

(см. табл. 3), а также соответствующие им диаграммы деформирования (рис. 7), видим, что для сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ после РКУП форма образца существенно влияет только на характеристики пластичности. Для плоских образцов относительное удлинение больше на 50%, чем та же характеристика для цилиндрических образцов. Также в два раза выше деформация разрушения и величина площадки фазового предела текучести. Изменение прочностных характеристик и модуля упрочнения незначительны, учитывая, что сравниваемые образцы изготовлены из разных заготовок.

В то же время независимо от формы образцов есть устойчивая корреляция между величиной поверхности рабочего участка образцов и характеристиками пластичности. На рис. 8 собраны все ранее представленные результаты по характеристикам пластичности для сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ после РКУП в зависимости от величины поверхности рабочего участка. Приведенные результаты для относительного удлинения δ_5 и величины площадки фазового предела текучести ϵ_y хорошо описываются экспоненциальной зависимостью. Результаты для деформации разрушения ϵ_{br} подчиняются экспоненциальной зависимости чуть хуже, но укладываются в априори известные пределы внутрипартийного разброса для подобных характеристик.

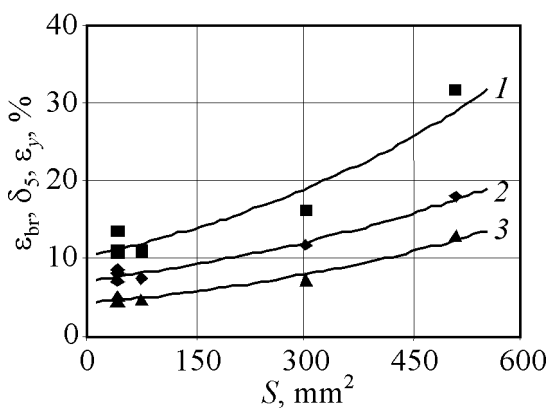


Рис. 8. Влияние величины поверхности рабочего участка образца на характеристики пластичности сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ после РКУП: 1 – деформация разрушения ϵ_{br} , 2 – относительное удлинение после разрыва δ_5 , 3 – величина площадки фазового предела текучести ϵ_y

Обратимая пластическая деформация. Во всех проведенных экспериментах по исследованию механических свойств сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ при растяжении наблюдалась частичная обратимость пластической деформации, обусловленная обратным мартенситным превращением после разгрузки образца в момент разрыва. Для обратимой пластической деформации можно записать

$$\varepsilon_{r.pl} = \varepsilon_{br} - \delta_5 - \sigma_{br}/E,$$

где: $\varepsilon_{r.pl}$ – обратимая пластическая деформация; ε_{br} – деформация разрушения; δ_5 – относительное удлинение после разрыва; σ_{br} – напряжение разрушения; E – модуль нормальной упругости.

Обратимая пластическая деформация сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ после РКУП растет с увеличением площади рабочей части испытуемого образца, поскольку величина $\varepsilon_{br} - \delta_5$ является возрастающей функцией от S (см. взаимное расположение кривых 1 и 2 на рис. 8), а член σ_{br}/E практически постоянен.

Характеристики упругости до и после РКУП исследовали на сплаве $Ti_{49.8}Ni_{50.2}$ производства компании МАТЕКС (Москва). Термообработка заготовок и параметры РКУП были такими же, как и для сплава $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$. Константы упругости определяли ультразвуковым методом [5], результаты исследований приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики упругости сплава $Ti_{49.8}Ni_{50.2}$ до и после РКУП

Характеристики упругости	Исходное, закаленное состояние	РКУП, 8- B_C
Модуль нормальной упругости E , N/mm^2	76400	63800
Модуль сдвига G , N/mm^2	27100	22400
Коэффициент Пуассона μ	0.41	0.43

РКУП сплава $Ti_{49.8}Ni_{50.2}$ увеличивает значение коэффициента Пуассона и уменьшает значения модулей упругости более чем на 15%. Указанные явления согласно [6] связаны с измельчением зерна при РКУП, приводящем к увеличению объемной доли зернограницной области [7,8].

Заключение. РКУП бинарных сплавов $TiNi$ приводит к измельчению зерна до 300 nm, что, в свою очередь, обуславливает повышение условного предела текучести, предела прочности при одновременном снижении относительного удлинения. Снизились также модули нормальной упругости и сдвига, при этом коэффициент Пуассона увеличился. Анизотропия механических свойств, исследованная при растяжении, отсутствует.

Имеет место масштабный эффект механических свойств при растяжении, заключающийся в увеличении прочностных и снижении пластических свойств при уменьшении характерного размера испытуемого образца. Су-

щественное влияние на характеристики пластичности оказывает форма образца. При одинаковом объеме рабочей части образца характеристики пластичности выше для плоских образцов. Наблюдается также повышение характеристик пластичности при увеличении поверхности рабочего участка образца.

1. *Н.Н. Попов*, Разработка прогрессивных технологий на основе материалов, обладающих эффектом памяти формы, ФГУП «РФЯЦ–ВНИИЭФ», Саров (2008).
2. *Н.Н. Попов, А.И. Кориунов, А.А. Аушев, М.Ю. Сидоркин, Т.И. Сысоева, И.В. Костылев, А.Е. Гусаров, В.В. Столяров*, ФММ **102**, 460 (2006).
3. *Р.З. Валиев, И.В. Александров*, Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией, Логос, Москва (2000).
4. *А.И. Кориунов, А.А. Смоляков, Т.Н. Кравченко, Л.В. Поляков, И.И. Каганова, И.В. Коротченкова*, ФТВД **18**, № 4, 87 (2008).
5. *Е. Бергман*, Ультразвук и его применение в технике, Изд-во иностр. лит., Москва (1956).
6. *А.А. Ботаки, В.Л. Ульянов, А.В. Шарко*, Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов, Машиностроение, Москва (1983).
7. *Ю.Н. Степанов, М.И. Алымов*, Металлы № 3, 65 (2004).
8. *Ю.Н. Степанов, М.И. Алымов*, Деформация и разрушение № 8, 38 (2005).

А.И. Кориунов, А.А. Смоляков, Т.Н. Кравченко, И.И. Каганова

ВПЛИВ РІВНОКАНАЛЬНОГО КУТОВОГО ПРЕСУВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$

Вивчено вплив рівноканального кутового пресування (РККП) на механічні властивості сплаву $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$. Показано, що обробка призводить до зменшення зерен до 300 нм, підвищення меж текучості і міцності при зниженні відносного видовження.

Ключові слова: бінарні сплави, механічні властивості, текстура, ефект масштабу

A.I. Korshunov, A.A. Smolyakov, T.N. Kravchenko, I.I. Kaganova

INFLUENCE OF THE EQUAL-CHANNEL ANGULAR PRESSING ON MECHANICAL PROPERTIES OF THE $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ ALLOY

The influence of the equal-channel angular pressing (ECAP) on mechanical properties of $Ti_{49.4}Ni_{50.6}$ alloy has been studied. It is shown that the processing results in grain refinement to 300 nm, increase of the yield point and ultimate strength and lowering of elongation

Keywords: binary alloys, mechanical properties, texture, scale effect

Fig. 1. Ti_{49.4}Ni_{50.6} alloy sample after ECAP

Fig. 2. Microstructure of alloy Ti_{49.4}Ni_{50.6} in original, hardened state: *a* – cross-section, *b* – longitudinal. Optical metallography

Fig. 3. Microstructure of alloy Ti_{49.4}Ni_{50.6} after ECAP: *a* – cross-section, *b* – longitudinal. TEM

Fig. 4. Conventional strain diagrams for alloy Ti_{49.4}Ni_{50.6}: 1 – original, hardened state, 2 – ECAP, 8-*B_C*

Fig. 5. Conventional strain diagrams for alloy Ti_{49.4}Ni_{50.6} after ECAP: 1 – along billet axis, 2 – transverse to billet axis

Fig. 6. Conventional strain diagrams for alloy Ti_{49.4}Ni_{50.6} after ECAP: 1 – specimen diameter 1.5 mm, 2 – 4 mm

Fig. 7. Conventional strain diagrams for alloy Ti_{49.4}Ni_{50.6} after ECAP: 1 – cylindrical specimen, 2 – flat

Fig. 8. Influence of the value of specimen working-part surface on plasticity characteristics of alloy Ti_{49.4}Ni_{50.6} after ECAP: 1 – breaking strain ϵ_{br} ; 2 – elongation at rupture δ_5 ; 3 – value of the phase yield strength area ϵ_y