

## **Влияние технологических аспектов получения сплава 44НХТЮ на его структуру и механические свойства при статическом и циклическом нагружении**

В. С. Воропаев, В. А. Назаренко, Ю. Ф. Луговской,  
Д. Г. Вербилло, С. А. Спиридонов

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича  
НАН Украины, Киев, e-mail: vanazarenko@gmail.com

*Проведено исследование условий получения прецизионного сплава 44НХТЮ с высокими технологическими свойствами в виде листов и измерение предельных свойств сплава при циклическом нагружении. Объектом исследования выбран прецизионный сплав 44НХТЮ, полученный тремя методами: формованием ленты из порошка сплава асимметричной прокаткой и последующим спеканием в вакууме при 1200 °С; электронно-лучевой плавкой и последующей прокаткой и методом Ospray процесса. Установлено, что прочностные, деформационные, усталостные и демпфирующие характеристики сплава 44НХТЮ, полученного электронно-лучевой плавкой, превышают таковые для сплава, полученного асимметричной прокаткой порошка сплава с последующим спеканием, а также методом Ospray процесса. Поэтому для получения тонкостенных изделий из сплава 44НХТЮ целесообразно применять электронно-лучевую плавку и прокатку. Впервые получены значения предела выносливости исследованных в работе сплавов при изгибе на частоте 2,4 кГц, которые достигают 270 МПа на базе  $10^7$  циклов. Прецизионный сплав 44НХТЮ, изготовленный по новым технологическим процессам, предназначен для использования в тонкостенных элементах конструкций с памятью формы.*

**Ключевые слова:** прецизионный сплав, усталость, прочность, прокатка.

Создание новых материалов неразрывно связано с исследованиями их структуры и комплекса механических свойств. В полной мере это относится и к разработке новых технологий получения прецизионного сплава 44НХТЮ, предназначенного для использования в тонкостенных элементах конструкций с памятью формы в условиях статического и циклического нагружения с высокими деформациями. Известно [1], что предел прочности ленты из сплава 44НХТЮ, упрочненной обработкой давлением, равен 800 МПа, но для прутков он может достигать 1200 МПа при относительном удлинении  $\delta = 13\%$ . Модуль Юнга материала составляет 179 ГПа. Высокая прочность и небольшая пластичность создают проблемы при изготовлении тонкостенных элементов конструкций из сплава 44НХТЮ даже при его нагреве, в частности, в процессе обработки давлением.

Известно также [2, 3], что этот материал обладает памятью формы, а материалы с такими свойствами характеризуются не только высокими упругими деформациями, но и высоким рассеиванием энергии. В связи с этим актуальными являются исследования как условий получения материала с высокими эксплуатационными свойствами в виде листов

© В. С. Воропаев, В. А. Назаренко, Ю. Ф. Луговской, Д. Г. Вербилло,  
С. А. Спиридонов, 2013

толщиной 1 мм, так и предельных свойств таких материалов при циклическом нагружении. Исследование этих вопросов — цель данной работы.

### Материалы и методы исследования

Исследовали механические свойства сплава 44НХТЮ, полученного тремя методами: 1 — формованием ленты из порошка сплава асимметричной прокаткой [4] и последующим спеканием в вакууме при 1200 °С (далее материал 1); 2 — электронно-лучевой плавкой и последующей прокаткой (материал 2); 3 — методом Ospray процесса и последующей прокаткой (материал 3). Результаты исследований сопоставляли с данными о структуре и известными свойствами сплава 44НХТЮ, полученного традиционным методом литья (материал 4).

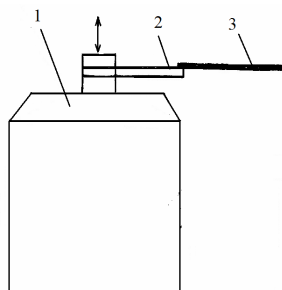
Порошки сплавов получали на установке газового распыления УРС-40, состоящей из индукционной печи и колонны распыления. Распыляли жидкий металл при температуре 1550 °С газообразным азотом при давлении на форсунке 0,5 МПа. В колонне распыления на пути струи капле распыленного жидкого металла устанавливали подложку (кристаллизатор), на которой из струи капле формировался литой симметричный относительно центра струи слиток. Масса слитка при струйном формовании (СФ) составляла около 25% от массы плавки. Для дальнейшей обработки прокаткой из средней (центральной) части слитка, полученного СФ, вырезали заготовку размером 10 x 100 x 100 мм.

Лента из материала 1 получена асимметричной прокаткой распыленных порошков с рассогласованием окружных скоростей валков 1,25. Лента была спечена в вакууме при температуре 1200 °С в течение часа и имела толщину  $H = 0,7$  мм. Ленты из материалов 2 и 3 имели толщину 1,2 и 0,9 мм соответственно и были получены прокаткой заготовок после электронно-лучевой плавки и струйного формования. Образцы размером порядка 2 x 5 x 30 мм в виде пластин постоянного поперечного сечения для испытаний при циклическом нагружении получали резкой алмазным кругом.

Свойства материалов 2 и 3 при статическом растяжении определяли на установке ИТМ-100 с автоматической записью диаграммы нагружения. Материал 1 испытать на растяжение не удалось из-за его хрупкости и трудности в изготовлении образцов.

Динамический модуль Юнга материалов определяли методами возбуждения в стержневых образцах собственных поперечных и продольных колебаний [5].

Усталостные свойства материалов на стержневых образцах постоянного поперечного сечения исследовали по методике [6] на установке ВЭДС-200 (рис. 1). При этом использовали стержневые образцы постоянного прямоугольного поперечного сечения с затупленными острыми кромками и состоянием поверхности,



прямоугольного поперечного сечения с затупленными острыми кромками и состоянием поверхности,

Рис. 1. Схема усталостных испытаний материалов на изгиб: 1 — виброэлектродинамический стенд (ВЭДС); 2 — промежуточная пластина; 3 — образец постоянного поперечного сечения.

полученной после прокатки. Частота резонансных колебаний образца составляла  $f = 2,4$  кГц.

Максимальное напряжение в опасном сечении образца рассчитывали на основании измерений амплитуды колебаний образца в двух точках — на его конце  $W_0$  и в зажиме промежуточной пластины  $W_1$ :

$$\sigma_a = 2\pi f W_0 (E\rho)^{1/2} [U(\alpha x) + PV(\alpha x)], \quad (1)$$

где коэффициент  $P$  и аргумент  $\alpha x$  функций А. Н. Крылова определяли из выражения

$$P = -T(\alpha x)/U(\alpha x) = [-S(\alpha x) - W_0/W_1]/T(\alpha x). \quad (2)$$

Анализ погрешностей величин, входящих в формулу для расчета напряжений по данной методике, показал, что основной вклад в погрешность вносят измерения амплитуды  $W_0$  (2%), модуля Юнга  $E$  (1%) и плотности  $\rho$  (0,7%) исследуемого материала. Погрешности определения величин  $\alpha$  и  $P$ , входящих в формулу (2), слабо влияют на точность расчетов. Суммарная систематическая погрешность расчета напряжений по формуле (1) составляет 4%.

Декремент колебаний  $\delta$  исследованных материалов определяли по методике, описанной в работе [7], на установке ВЭДС-200 по ширине резонансной кривой на частоте около 240—440 Гц и первой форме собственных изгибных колебаний консольно закрепленных образцов в зависимости от максимальных циклических деформаций  $\varepsilon$ . Величину декремента колебаний рассчитывали по формуле

$$\delta = \pi K_{0,5} \Delta f/f, \quad (3)$$

где  $K_{0,5} = 2^{n-1}/(2^{2n} - 1)^{1/2} = 1/(3)^{1/2}$  для уровня 0,5 максимальной амплитуды на данном уровне возбуждения;  $n$  — параметр, характеризующий степенную (по предположению) зависимость декремента колебаний  $\delta$  от амплитуды ( $\delta = C_0 W_0^{n-1}$ );  $\Delta f$  — ширина резонансного пика на уровне 0,5 $W$ ,  $W$  — амплитуда резонансных колебаний свободного конца образца;  $f$  — резонансная частота на минимальном уровне возбуждения колебаний. Величину  $\varepsilon$  рассчитывали по формуле  $\varepsilon = \sigma_a/E$ .

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Структура исследованных материалов представлена на рис. 2, *a—в*. Видно, что исследуемые материалы содержат поры диаметром 1—10 мкм. На рис. 2, *б* и *в* наблюдаются полосы из частиц второй фазы, выделившихся из матрицы. Общая пористость исследуемых материалов, рассчитанная по величине измеренной плотности, составляет менее 1%.

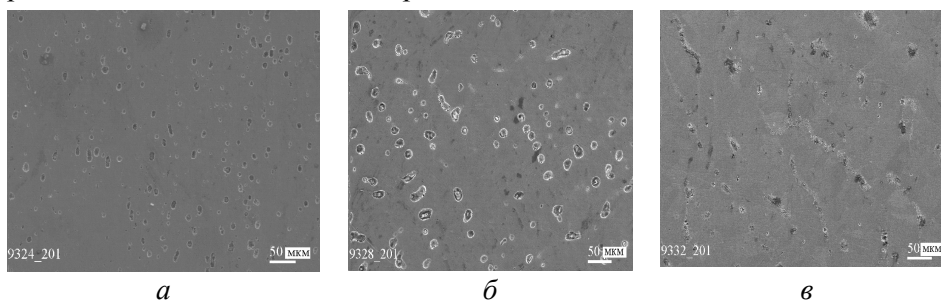


Рис. 2. Структура сплава 44НХТЮ: *a* — стандартный материал (материал 4); *б* — полученный электронно-лучевой плавкой (материал 2); *в* — полученный методом Ospray процесса (материал 3).

Оценим пористость материала 1 плотностью  $\rho = 7,26 \text{ г/см}^3$ , полагая, что плотность компактного материала 44НХТЮ равна  $8,2 \text{ г/см}^3$ . Тогда пористость  $\theta = (\rho_0 - \rho)/\rho = (8,2 - 7,26)/8,2 = 0,115$ .

Усредненные значения модуля Юнга материалов 2 и 3 составляют в среднем 183 ГПа. Если принять эту величину за модуль Юнга компактного материала  $E_0 = 183 \text{ ГПа}$ , то в соответствии с уравнением Маккензи для пористого тела с квазисферическими порами расчётный модуль Юнга  $E = E_0(1 - 0,98\theta)^2 = 144 \text{ ГПа}$ . В более точной модели В. В. Скорохода расчётный модуль Юнга порошкового тела составляет  $E = 148 \text{ ГПа}$  [8]. Экспериментальное значение  $E = 168 \text{ ГПа}$ . Такая большая величина экспериментальных значений  $E$ , вероятно, обусловлена влиянием анизотропии пористой структуры после прокатки. Для уточнения полученных результатов необходимо проведение дополнительных исследований.

Результаты механических испытаний при статическом растяжении материалов 2 и 3 представлены в табл. 1. В ней, помимо стандартных величин, характеризующих прочностные ( $\sigma_{\text{в}}$ ,  $\sigma_{0,2}$ ,  $\sigma_{0,01}$ ) и пластические свойства ( $\delta_{\text{равн}}$ ,  $\delta_{\text{общ}}$ ,  $\Psi$ ), приведены значения дисперсий указанных величин  $S_{0,2}$ ,  $S_{\text{в}}$ ,  $S_{\delta_{\text{равн}}}$ ,  $S_{\delta_{\text{общ}}}$ ,  $S_{\Psi}$ . Из таблицы следует, что прочностные свойства материалов 2 и 3 практически одинаковы, поскольку дисперсии величин  $\sigma_{\text{в}}$  перекрывают разницу между сопоставляемыми значениями. Пониженные значения предела текучести материала 2 (ЭЛП) объясняются большими размерами зерна, что обусловлено увеличенным временем кристаллизации по сравнению со струйным формованием. Материал 2 имеет разброс механических свойств при статическом растяжении (величины дисперсий) на порядок меньше, чем материал 3.

Сопоставление полученных в работе результатов с известными из литературы данными о механических свойствах нагартованной ленты [1] показывает, что прочность материалов 2 и 3 меньше, а пластичность существенно выше, чем у стандартного материала 4. Такое сочетание прочности и пластичности исследуемых материалов обусловлено необходимостью их прокатки на малую толщину. Это, в свою очередь, потребовало применения более чистых компонентов и, соответственно, более высокой пластичности исследуемых сплавов 44НХТЮ, что трудно обеспечить в условиях больших объемов плавки.

Данные о механических свойствах всех исследованных материалов при циклическом нагружении представлены на рис. 3, а. Видно, что предел выносливости  $\sigma_{-1}$  материала 1 составляет 150 МПа, материала 2 — 270 МПа, материала 3 — 250 МПа.

Данных о сопротивлении усталости сплава 44НХТЮ в литературе найти не удалось. Близкие по составу стали имеют более высокое сопро-

**Т а б л и ц а 1. Механические свойства сплава 44НХТЮ при статическом растяжении**

Материал	$\sigma_{0,01}$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$S_{0,2}$	$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$S_{\text{в}}$	$\delta_{\text{равн}}$ , %	$S_{\delta_{\text{равн}}}$	$\delta_{\text{общ}}$ , %	$S_{\delta_{\text{общ}}}$	$\Psi$ , %	$S_{\Psi}$
2	303	343	26,6	665	31	32,7	0,2	34,6	0,92	25,7	0,28
3	380	419	121,8	670	76	27,6	17	35,6	16,45	26,2	5,1

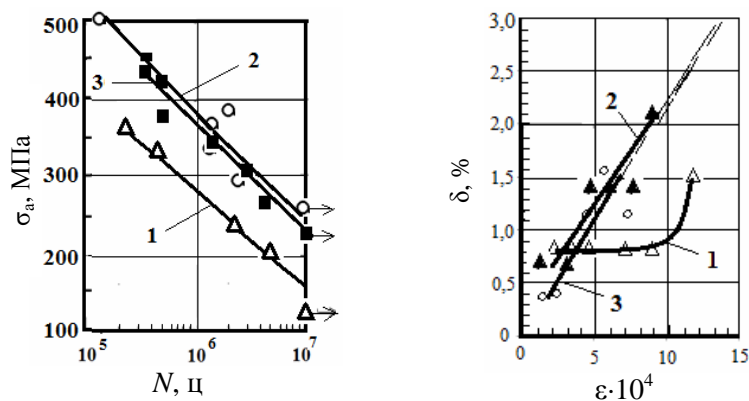


Рис. 3. Кривые усталости (а) и зависимость  $\delta$ — $\epsilon$  (б) сплава 44НХТЮ, полученного асимметричной прокаткой порошка (1), электронно-лучевой плавкой (2) и струйным формованием (3).

## Т а б л и ц а 2. Упругие и усталостные характеристики сплавов 44НХТЮ, полученных по различным технологиям

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Модуль Юнга $E$ , ГПа	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\epsilon_{-1} \cdot 10^{-4}$	$\delta_{-1}$ , %
1	7,26	168	150	8,87	0,8
2	8,2	182	270	14,8	3,2
3	8,2	184	250	13,6	2,8

тивление усталости [9]. Например, для стали 45ХНМФА предел выносливости на базе  $10^7$  циклов при консольном изгибе на воздухе при комнатной температуре и частоте нагружения 50 Гц составляет 620—670 МПа. Для стали 44Х10Г7  $\sigma_{-1} = 345$ —450 МПа.

На рис. 3, б представлены зависимости декремента колебаний  $\delta$  исследованных материалов от величины максимальных деформаций  $\epsilon$  в консольном образце, колеблющемся на первой форме изгибных резонансных колебаний. Зависимости  $\delta$ — $\epsilon$  монотонно возрастающие, что характерно для сталей [7]. Однако уровень значений  $\delta$  не достигает величины декремента колебаний, присущего материалам с памятью формы, для которых характерны значения декремента колебаний  $\delta$  более 10% в рабочем диапазоне циклических деформаций.

Значения модуля Юнга и усталостных характеристик на уровне предела выносливости исследованных сплавов приведены в табл. 2. Величину предельной циклической деформации  $\epsilon_{-1} = \sigma_{-1}/E$  определяли по известным значениям  $\sigma_{-1}$  и  $E$ , декремент колебаний на уровне предела выносливости  $\delta_{-1}$  — на пересечении продолжения экспериментальных кривых  $\delta$ — $\epsilon$  с вертикалями от значений  $\epsilon = \epsilon_{-1}$ .

### Выводы

Установлено, что прочностные, деформационные, усталостные и демпфирующие характеристики сплава 44НХТЮ, полученного электронно-лучевой плавкой с последующей прокаткой, превышают таковые сплава, полученного асимметричной прокаткой порошка сплава с последующим спеканием, а также методом Ospray процесса.

Пониженные механические свойства материала, полученного асимметричной прокаткой, вызваны наличием остаточной пористости, которая сохраняется после спекания материала. При этом экспериментальные значения модуля Юнга превышают значения этой величины, рассчитанные по моделям Маккензи и Скорохода.

Предел выносливости исследованных сплавов 44НХТЮ при изгибе на частоте 2,4 кГц достигает 270 МПа на базе  $10^7$  циклов.

Модули Юнга материалов, полученных электронно-лучевой плавкой, а также методом Ospray процесса, близки к такой величине сплава 44НХТЮ, известной из литературы. Декремент колебаний исследованных материалов на пределе выносливости составляет около 3%, что ниже данных для сплавов с эффектом памяти формы.

1. [splav.kharkov.com>mat\\_start.php](http://splav.kharkov.com/mat_start.php)
2. Тихонов А. С. Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении / А. С. Тихонов, А. П. Герасимов, И. И. Прохорова. — М. : Машиностроение, 1981. — 81 с.
3. Ооцука К. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцука, К. Симидзу, Ю. Судзуки / Под ред. Х. Фунакубо. — М. : Металлургия, 1990. — 224 с.
4. Калуцкий Г. Я. Опыт прокатки металлических порошков и гранул с использованием асимметричных схем деформирования / Г. Я. Калуцкий, К. А. Гогаев, В. С. Воропаев // Порошковая металлургия. — 2007. — № 3/4. — С. 115—121.
5. Кузьменко В. А. Звуковые и ультразвуковые колебания при динамических испытаниях материалов. — К. : Изд-во АН УССР, 1963. — 152 с.
6. Луговской Ю. Ф. Методика усталостных испытаний при изгибе композиционных материалов, полученных электронно-лучевым испарением // Проблемы специальной электрометаллургии. — 1987. — № 4. — С. 61—65.
7. Писаренко Г. С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. — К. : Наук. думка. — 1971. — 375 с.
8. Скороход В. В. Некоторые физические свойства высокопористых тел // Порошковая металлургия. — 1967. — № 6. — С. 33—38.
9. Троценко В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов / В. Т. Троценко, Л. А. Сосновский. — К. : Наук. думка, 1987. — Ч. 2. — 1303 с.

### **Вплив технологічних аспектів отримання сплаву 44НХТЮ на його структуру та механічні властивості при статичному і циклічному навантаженні**

В. С. Воропаєв, В. О. Назаренко, Ю. Ф. Луговський,  
Д. Г. Вербило, С. А. Спиридонов

*Проведено дослідження умов виготовлення прецизійного сплаву 44НХТЮ з високими технологічними властивостями у вигляді листів і виміряно граничні властивості сплаву при циклічному навантаженні. Об'єктом дослідження вибрано прецизійний сплав 44НХТЮ, отриманий трьома методами: формуванням стрічки з порошку сплаву асиметричним прокатуванням і подальшим спіканням у вакуумі при 1200 °С; електронно-променевою плавкою і подальшим прокатуванням та методом Ospray процесу. Встановлено, що прочностные, деформаційні, втомні і демпфуючі характеристики сплаву 44НХТЮ, отриманого електронно-променевою плавкою, перевищують такі для сплаву, одержаного асиметричною прокаткою порошку сплаву з подальшим*

спіканням, а також методом Ospray процесу. Тому для виготовлення тонкостінних виробів із сплаву 44НХТЮ доцільно застосовувати електронно-променеву плавку і прокатку. Вперше отримано значення межі витривалості для досліджених у роботі матеріалів при згині на частоті 2,4 кГц, які досягають 270 МПа на базі  $10^7$  циклів. Прецизійний сплав 44НХТЮ, виготовлений за новими технологічними процесами, призначений для використання в тонкостінних елементах конструкцій з пам'яттю форми.

**Ключові слова:** прецизійний сплав, втома, міцність, прокатка.

### **The influence of the synthesis technology for the 44НХТЮ alloy on the structure and mechanical properties during static and cyclic loading**

V. S. Voropaiev, V. A. Nazarenko, U. F. Lugovskoi, D. G. Verbylo,  
S. A. Spiridonov

*Research of terms of receipt of precision alloy of 44НХТЮ with high technological properties as follies and measuring of maximum properties of alloy is in-process conducted at a cyclic laddering. A research object was a precision alloy of 44НХТЮ, got three methods: shaping of ribbon from powder of alloy asymmetric rolling and subsequent sintering in a vacuum at 1200 °C; the cathode-ray melting and subsequent rolling; by the method of Ospray process. It is set that, deformation, tireless and dampings descriptions of alloy of 44НХТЮ, got the cathode-ray melting, such exceed for an alloy, got the method of the asymmetric rolling of powder of alloy with subsequent sintering, and also method of Ospray of process. Therefore for the receipt of thin wares from the alloy of 44НХТЮ it is expedient to apply the cathode-ray melting and rolling. The values of limit of endurance of investigational in-process alloys are first got at a bend on frequency 2,4 кГц, which arrive at a value 270 МПа on the base of  $10^7$  cycles. The precision alloy of 44НХТЮ is made on new technological processes, purpous for the use in the thin-walled elements of constructions with memory of form.*

**Keywords:** precision alloy, fatigue strength, rolling.