



# СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ТОНКОЛИСТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЖЕЛЕЗНИКЕЛЕВОГО СПЛАВА 32НКА, ПОЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

А. А. БОНДАРЕВ, д-р техн. наук, Е. Г. ТЕРНОВОЙ, инж., В. И. ШВЕЦ, канд. техн. наук, С. В. НАЗАРЕНКО, инж. (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
 Б. М. РАССАМАХИН, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»),  
 Г. В. ТАРАСОВ, инж. (КБ «Южное», г. Днепропетровск)

Приведены данные свариваемости электронным лучом железоникелевого сплава 32НКА типа инвар. Оптимизированы параметры режимов сварки различных типов соединений применительно к изготовлению тонкостенных оболочечных конструкций. Исследованы химический состав, механические свойства, микроструктура, плотность и твердость сварных соединений, химическая неоднородность, проведен рентгеноструктурный анализ зоны рекристаллизации. Даны рекомендации по применению электронно-лучевой сварки для промышленного изготовления конструкции.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, свариваемость, электронный луч, никелевый сплав, механические свойства, микроструктура, тонколистовая обечайка

Развитие современной техники требует новых подходов к созданию конструкций из специальных материалов, позволяющих воплощать конструкторско-технологические решения, которые не могут быть реализованы традиционными средствами. Так, например, в метрологии, криогенной и космической технике нашли применение прецизионные никелевые сплавы, имеющие особые тепловые свойства с заданными температурными коэффициентами линейного расширения (ТКЛР) порядка  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$  и ниже [1, 2].

Значения ТКЛР, близкие к нулевому, необходимы для обеспечения высокой точности измерительного инструмента, а также для корпусов и некоторых узлов в оптических системах газовых лазеров и телескопов. Создание телескопов в последнее время обусловлено использованием их на космических объектах с целью наблюдения из космического пространства за состоянием земной поверхности при решении всевозможных строительных работ, а также в геодезии. Существенными особенностями при эксплуатации этих приборов в условиях космоса является особый температурный режим — перепад температур от 100... 120 (при повышенной солнечной радиации) до -100... -120 °С (при нахождении объекта в тени Земли), а также глубокий естественный вакуум.

С целью обеспечения оптических и эксплуатационных характеристик аппаратуры и с учетом особенностей условий космического пространства в качестве конструкционного материала для проведения исследований по свариваемости, рекомендован железоникелевый сплав 32НКА, имеющий минимальный ТКЛР порядка  $\alpha \leq 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Температурный коэффициент линейного расширения сплавов Fe-Ni-Co с содержанием никеля ниже 60 % (мас.) имеет аномальный ход. Уровень самого минимального расширения соответствует сплаву, содержащему 36 % Ni. Сплавы с таким или близким содержанием никеля называют инварами. В табл. 1 приведен химический состав некоторых марок сплавов типа инвар.

«Инварный эффект» проявляется в сплавах с содержанием никеля примерно 36 % (с отклонением в одну и другую сторону, т. е. в диапазоне 30... 40 %). Для сплавов этой группы характерна существенная зависимость значения температуры Кюри и ТКЛР от концентрации основных элементов. При этом нужно учитывать влияние элементов на температурный интервал «инвариности», определяемый температурой Кюри при нагреве и температурой  $\alpha \rightarrow \gamma$ -перехода при охлаждении до

Таблица 1. Химический состав железоникелевых сплавов

Марка сплава	Массовая доля элементов, %							
	Ni	Co	Fe	C	Si	S	P	Mn
33Н	36	—	Основа	0,05	0,3	0,012	0,02	0,5
35НКТ	34,5	5,5	»»	0,05	0,5	0,015	0,02	0,3
32НК-ВИ	32,5	4,2	»»	0,02	0,03	0,015	0,02	0,2

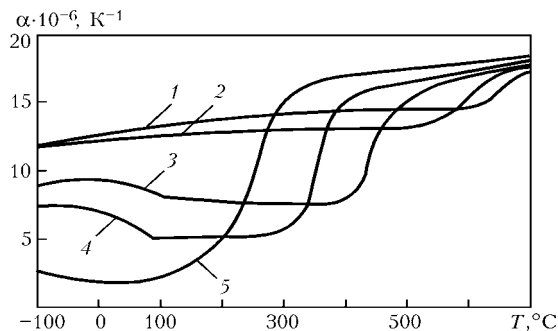


Рис. 1. Температурная зависимость коэффициента линейного расширения железоникелевых сплавов: 1 — 64,8; 2 — 57,7; 3 — 46,3; 4 — 42,0; 5 — 35,4 % Ni

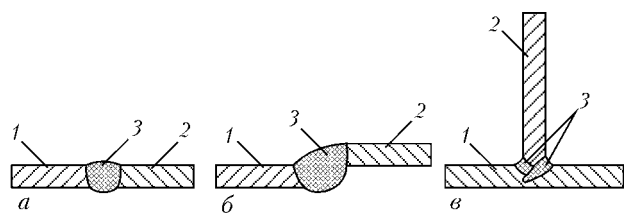


Рис. 2. Типы сварных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой на сплаве 32НКА: *a* — стыковое; *b* — нахлесточное; *в* — тавровое; 1, 2 — стыкуемые элементы; 3 — сварные швы

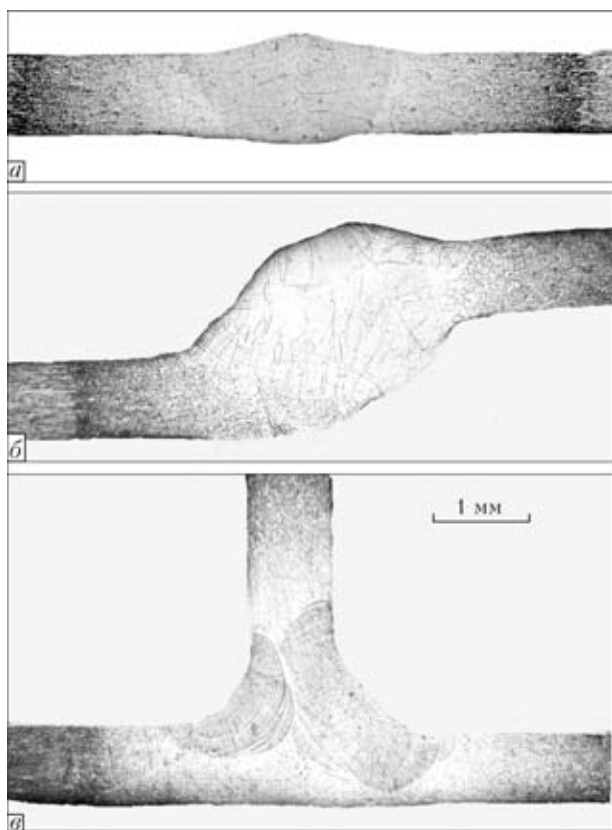


Рис. 3. Макроструктура сварных соединений: *a* — стыковое; *b* — нахлесточное; *в* — тавровое

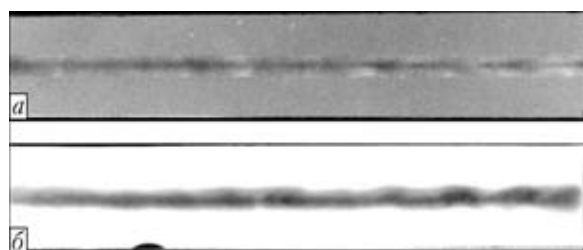


Рис. 4. Рентгенограмма сварных соединений, выполненных электронно-лучевой сваркой на сплаве 32НКА толщиной 0,8 мм: *a* — стыковое; *b* — нахлесточное со сквозным проплавлением

Таблица 2. Режимы сварки соединений сплава 32НКА

Тип соединения	Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА	Скорость сварки, м/ч
Стыковое	18	72	50
Нахлесточное	20, 30, 35	72	50
Тавровое	22	72	50

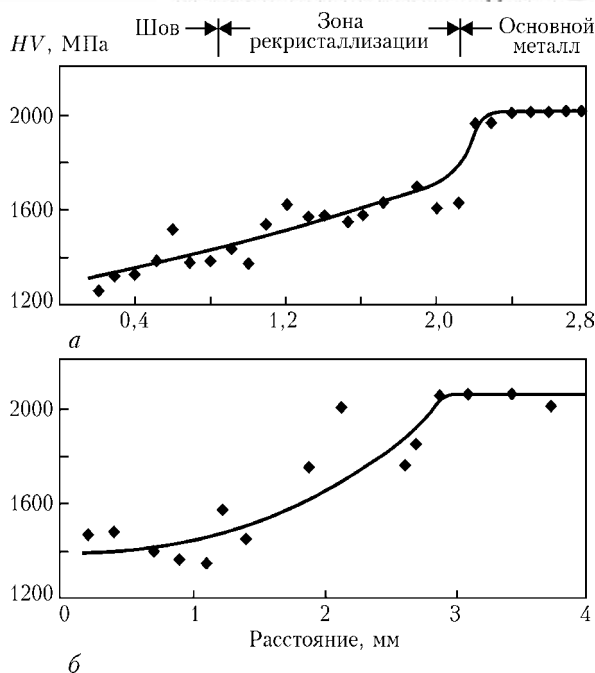


Рис. 5. Распределение микротвердости в различных зонах сварных соединений железоникелевого сплава 32НКА: *a* — стыковое соединение; *b* — тавровое соединение

комнатных температур и ниже. Особенно это может проявиться в зоне рекристаллизации в процессе выполнения соединений сваркой плавлением.

Для сварки Fe-Ni-Co сплавов применяются аргодуговая, микроплазменная, лазерная сварка, сварка некогерентным световым лучом и электронно-лучевая в вакууме [3–8].

Учитывая изложенное выше и то, что применение небольших толщин для конструкций значительных габаритов может вызвать большие трудности по точности изготовления и предотвращению деформаций при выполнении прочноплотных вакуумных швов с узкой зоной рекристаллизации для сохранения заданного ТКЛР, выбран способ электронно-лучевой сварки в вакууме [9].

Выбор оптимальных параметров процесса и режимов электронно-лучевой сварки сплава 32НКА выполняли на образцах толщиной 0,8 мм. Варианты полученных типов соединений показаны на рис. 2, режимы сварки приведены в табл. 2.

Сварку проводили с использованием источника питания У-250А с ускоряющим напряжением 30 кВ. Внешний осмотр соединений и анализ макрошлифов поперечных сечений (рис. 3) показал, что стыковые и нахлесточные соединения выполнены с полным сквозным проплавлением, а тавровые — без сквозного проплавления, но с двух

Таблица 3. Химический состав участков сварного соединения, выполненного электронно-лучевой сваркой на сплаве 32НКА

Участок соединения	Массовая доля элементов, %		
	Ni	Co	Fe
Основной металл в исходном состоянии	31,9	3,95	Основа
Зона рекристаллизации	31,8	4,0	»»
Металл шва	31,5	3,9	»»

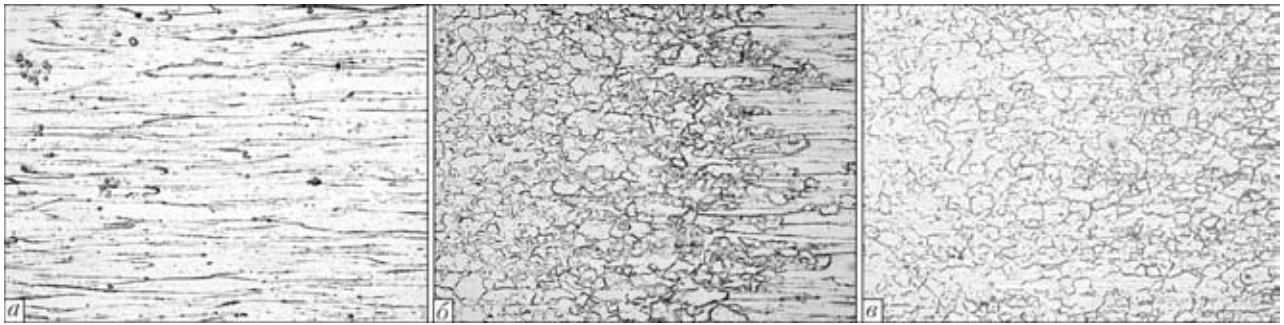


Рис. 6. Микроструктура основного металла и зоны рекристаллизации сварного соединения сплава 32НКА, выполненного электронно-лучевой сваркой,  $\times 150$ : *a* — основной металл; *b* — зона сплавления; *в* — зона рекристаллизации металла ЗТВ в средней части



Рис. 7. Микроструктура сварного соединения сплава 32НКА, выполненного электронно-лучевой сваркой, на участке перехода от зоны рекристаллизации к металлу шва: *a* — зона рекристаллизации вблизи шва,  $\times 150$ ; *b* — зона сплавления,  $\times 150$ ; *в* — металл шва,  $\times 250$

сторон и с перекрытием в корне шва, что и соответствовало требованиям по сварке конструкции тубуса телескопа. Сплошность сварных соединений контролировали с помощью методов рентгеновской дефектоскопии на установке РУП. Пор и других дефектов в стыковых и нахлесточных соединениях не обнаружено (рис. 4). Исследование распределения микротвердости проводили на твердомере фирмы «Lego». Отпечатки выполняли при нагрузке 20 г и времени выдержки 15 с, расстояние между ними составляло 200 мкм (рис. 5). Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе «Neophot-32».

Химический состав основного металла и металла шва определяли с помощью спектрального анализа, результаты которого приведены в табл. 3.

Исследование химической микронеоднородности соединения проводили с использованием методик микрорентгеноспектрального анализа на микроанализаторе «SX-50» фирмы «Самеса». Согласно результатам микрорентгеноспектрального

анализа распределение никеля и кобальта в соединении однородно (табл. 3).

Механические испытания на временное сопротивление разрыву выполняли на стыковых образцах. Результаты испытаний показали, что временное сопротивление разрыву составляет 525 МПа, что соответствует около 74 % временного сопротивления основного металла в термообработанном состоянии.

На стыковом соединении проведены исследования микроструктуры и химической микронеоднородности сварных соединений. В работе использовали оптический микроскоп «Neophot-32», микроанализатор «Самебах» с микроскопом SX-50. В основном металле наблюдали деформируемые прокатом зерна (рис. 6, *a*), переходящие в равноосные зерна в зоне рекристаллизации (рис. 6, *b*), исчезновение волоконных зерен и образование мелкозернистой структуры с утолщенными границами зерен на этом участке. По мере приближения к шву размер зерен увеличивается (рис. 6, *в*) и зерна приобретают полиэдрическую форму. При этом границы зерен становятся более тонкими. Пе-

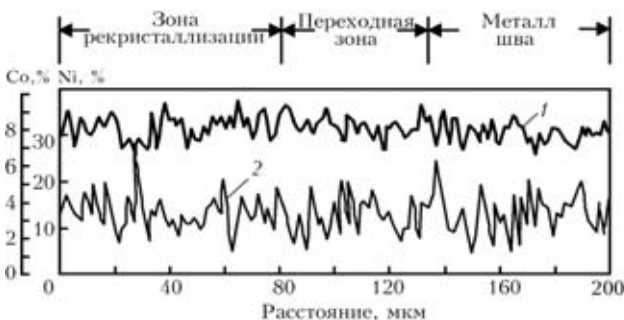


Рис. 8. Распределение легирующих элементов никеля (1) и кобальта (2) в зоне рекристаллизации, переходной зоне и в металле шва стыкового соединения сплава 32НКА

Таблица 4. Локальный химический состав участков сварного соединения сплава 32НКА, определенный микрорентгеноспектральным микроанализатором «Самебах»

Участок соединения	Массовая доля элементов, %				
	Si	Mn	Co	Ni	Fe
Основной металл	0,213	0,001	4,168	31,982	63,636
Зона рекристаллизации	0,226	0,001	4,252	31,875	63,646
Металл шва	0,224	0,000	4,360	31,906	63,510

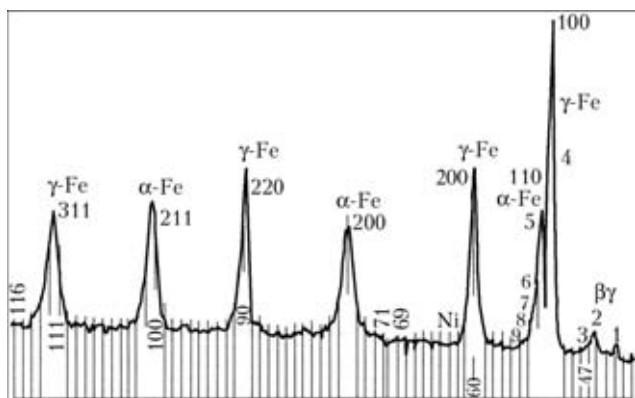


Рис. 9. Спектрограмма фазового состава зоны рекристаллизации сварного стыкового соединения сплава 32НКА, выполненного электронным лучом

реход от зоны рекристаллизации в зону шва однородный (рис. 7, а-б).

При микрорентгеноспектральном анализе (как точечном с локальностью 1 мкм (табл. 4), так и путем сканирования (рис. 8) всех участков) установлена высокая степень химической однородности металла соединения: содержание никеля во всех случаях составило 31,5...31,9 %, кобальта приблизительно 4,0...4,2 %, остальное — железо. Содержание марганца обнаружено на границе сплавления в виде следов. В качестве сопутствующего элемента зафиксировано незначительное количество кремния (до 0,25 %), также равномерно распределенного в соединении.

Таким образом, наблюдаемая картина микроструктур обусловлена не химической неоднородностью, а собственно структурными изменениями в зоне рекристаллизации, а также возможным  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращением, при котором «инварный эффект» и плотность сплава в зоне рекристаллизации могут значительно снизиться. А это способствует увеличению ТКЛР и потере вакуумной плотности в тонкостенных конструкциях.

Был проведен рентгеноструктурный анализ фазовых и структурных превращений зоны рекристаллизации сварного соединения методом дифракции рентгеновских лучей на установке «Дрон-3м» в  $K_{\alpha}$ -кобальтовом излучении. Полученная спектрограмма (рис. 9) свидетельствует о фазовом составе сплава, имеющем твердый раствор на основе  $\gamma$ -(Fe, Ni), в котором, очевидно, растворяется марганец и кобальт, что видно по измененным значениям межплоскостных расстояний  $d_{\alpha}$  (табл. 5). Линии чистого никеля или кобальта не обнаружены. Выявленные единичные линии  $\alpha$ -Fe присутствуют в небольших количествах. Это подтверждает «инварный эффект» на данном участке, претерпевшем нагрев от температуры плавления до

Таблица 5. Фазовый состав сварного соединения сплава 32НКА в зоне рекристаллизации

Дифракционные характеристики				Фазовый состав сплава
2 $\theta$ , град	$\theta$ , град	$d_{\alpha}$ , нм	$J$	
51,25	25,625	0,20701	100	$\gamma$ -Fe
52,80	26,40	0,20131	41	$\gamma$ -(Fe, Ni, Mn, Co)
53,50	26,75	0,19887	15	$\gamma$ -(Fe, Ni)
53,75	26,875	0,19805	12	$\beta$ — слабая линия
59,50	29,75	0,18039	12	$\gamma$ -(Fe, Ni), $\beta$ -линия
59,90	29,95	0,17929	52	$\gamma$ -(Fe, Ni)
74,90	37,45	0,14721	30	Не выявлено
89,80	44,90	0,12681	47	$\gamma$ -Fe + $\gamma$ -(Fe, Ni)
100,3	50,15	0,11659	36	$\alpha$ -Fe
110,8	55,4	0,10874	12	$\gamma$ -Fe, $\beta$ — слабая линия
111,7	55,85	0,10816	32	$\gamma$ -Fe

комнатной. Следовательно, выбранный способ электронно-лучевой сварки, характеризующийся высокими скоростями с минимальным тепловложением, узкой зоной термического влияния и минимальным сечением сварного шва, можно считать оптимальным и рекомендовать его при промышленном изготовлении узлов и тубуса телескопа.

1. *Прецизионные сплавы* / Г. З. Клевцкая, В. Н. Веселкова, А. И. Зугман и др. Справочник. — 2-е изд., доп. и перераб. / Под ред. Б.В. Молотилова. — М.: Металлургия, 1983. — 483 с.
2. *Прецизионные сплавы с особыми свойствами теплового расширения и упругости* / А. К. Борисова, С. С. Грицианова, С. И. Олевский др. — Справочник. — М.: Изд-во стандартов, 1972. — 152 с.
3. *Бадьянов Б. Н.* Проблемы свариваемости материалов электронной техники // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Металлургия сварки и сварочные материалы», посвященная памяти проф. д-ра техн. наук Г. Л. Петрова (1913–1993), СПб., 1–2 июня, 1993. — СПб., 1993. — С. 189–190.
4. *Bortski U.* Vergleich des WIG. Mikroplasma-und Elektronenstrahlfeinsweissens // Schweisstechnik (B). — 1972. — 22, № 7. — S. 310–312.
5. *Редчиц В. Б.* Применение некогерентного светового излучения дуговых ксеноновых ламп для пайки и сварки приборов // Материалы сем. Ресурсосберегающие прогрессивные технологии в сварочном производстве для машиностроительного комплекса». — М.: Об-во «Знание» РСФСР, 1989. — С. 88–90.
6. *Опарин М. И.* Технологические возможности мобильных малогабаритных установок для сварки и обработки световым лучом // Тез. докл. «Респуб. науч.-техн. конф. «Новые материалы и технологии», 4–5 февр. 1997 г. — М., 1997. — С. 167.
7. *Yaman Y. M., Kushan M. C.* Hot cracking susceptibilities in the heat-affected zone of electron beam-welded Inconel 718 // J. Mater. Sci. Lett. — 1998. — 17, № 4. — P. 1231–1234.
8. *Особенности лазерной сварки тонколистовой стали и инвара* / В. И. Завидей, А. Н. Ермолаев, А. П. Лебедев, Ф. В. Душин // Свароч. пр-во. — 1989. — № 6. — С. 8–11.
9. *Kiser S. D.* Sound welds in nickel alloys // Weld. Des. and Fabr. — 1998. — 61, № 10. — P. 86–88.

The paper gives the basic data on weldability of iron-nickel alloy 32NKA of invar type in electron beam welding. Parameters of welding modes are optimized for different joint types for the case of fabrication of thin-walled shell structures. Composition, mechanical properties, microstructure, density and hardness of welded joints, chemical inhomogeneity have been studied, and X-ray diffraction analysis of the recrystallisation zone has been performed. Recommendations are given on application of the process for commercial fabrication of structures.

Поступила в редакцию 05.02.2004