



УДК 621.791.72

## СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ МИКРОПЛАЗМЕННОЙ ПОРОШКОВОЙ СВАРКОЙ

Академик НАН Украины **К. А. ЮЩЕНКО**, **А. В. ЯРОВИЦЫН**, инж., **А. В. ЗВЯГИНЦЕВА**, канд. техн. наук  
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Установлено, что повышенное содержание кислорода и азота в металле шва негативно влияет на пластичность сварных соединений жаропрочных никелевых сплавов при рабочей температуре. Применительно к условиям ремонтной микроплазменной порошковой сварки определен диапазон содержания кислорода и азота в металле шва, при котором обеспечиваются его качественное формирование и удовлетворительные механические свойства сварных соединений.

*Ключевые слова:* микроплазменная порошковая сварка, наплавка, жаропрочный никелевый сплав, сварное соединение, содержание кислорода и азота, кратковременные механические свойства

Известно, что вредными примесями в жаропрочных никелевых сплавах, снижающими жаропрочность [1] и трещиностойкость [2] при сварке, наряду с другими элементами являются кислород и азот. В современных жаропрочных никелевых сплавах их содержание после вакуумно-индукционного переплава ограничивается (0,0015 мас. % для каждого) [1]. Металлургическим способом борьбы с горячими трещинами при сварке никеля и его сплавов наряду с измельчением структуры металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ) и формированием оптимального термометалургического цикла является ограничение содержания кислорода в металле шва до 0,005 мас. % [3]. Особенность технологии сварки жаропрочных никелевых сплавов состоит в присутствии тугоплавких оксидных пленок на поверхности свариваемого металла [4, 5]. В связи с этим рекомендуется применять технологические приемы, ограничивающие окисление наплавленного металла [6].

Для ремонта лопаток из жаропрочных никелевых сплавов перспективно применение плазменно-дуговых способов сварки с использованием присадочного порошка [7, 8]. При микроплазменной порошковой наплавке [9] для ремонта лопаток вследствие снижения эффективности защиты зоны сварки могут возникать дефекты микроструктуры (рис. 1), а при увеличении содержания кислорода и азота в наплавленном металле могут изменяться механические свойства сварных соединений.

При ремонтной микроплазменной порошковой сварке жаропрочных никелевых сплавов в отличие от широко применяемой аргонодуговой свар-

ки вольфрамовым электродом с использованием присадочного металла [5, 6] присутствует ряд факторов, которые снижают эффективность защиты зоны сварки: увеличенная длина дуги; наличие возмущения течения газовых потоков при введении порошка; внесение в сварочную ванну с порошком дополнительных примесей.

Одним из методов оценки эффективности защиты зоны сварки инертными газами является определение содержания кислорода и азота в металле сварного шва [10], которое зависит не только от химического состава основного металла и сварочных материалов, но и от способа сварки [11].

Целью данной работы является исследование влияния технологических параметров на содержание кислорода и азота в металле шва и оценка изменения механических свойств сварных соединений при микроплазменной порошковой сварке жаропрочных никелевых сплавов.

Для количественной оценки содержания газов в наплавленном металле выполняли наплавку порошком жаропрочного никелевого сплава с со-

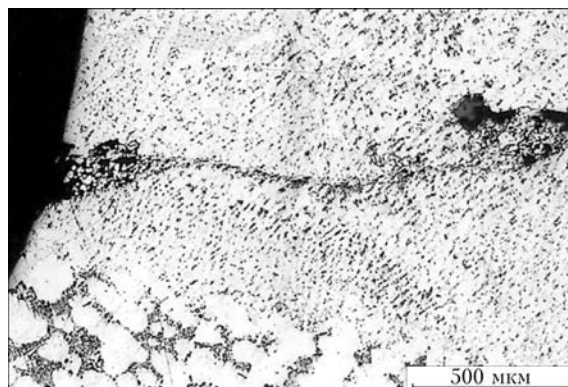


Рис. 1. Микроструктура участка наплавленного металла с оксидным включением, полученная при ремонтной микроплазменной порошковой сварке лопаток из жаропрочных никелевых сплавов



Таблица 1. Химический состав (мас. %) исследуемых жаропрочных никелевых сплавов

Сплав	C	Si	Mn	W	Cr	Mo	Ti	Al
C 50 об. % $\gamma'$ -фазы	$\leq 0,17$	$\leq 0,3$	$\leq 0,5$	2,6	16,0	1,8	3,4	3,4
ЭИ-698	$\leq 0,08$	$\leq 0,4$	$\leq 0,4$	—	13,0...16,0	2,8...3,2	2,35...2,75	1,3...1,7

Окончание табл. 1

Сплав	Nb	Co	Fe	B	Ta	Zr	[O]	[N]
C 50 % об. $\gamma'$ -фазы	0,9	8,5	$\leq 0,3$	$\leq 0,01$	1,8	0,1	0,0007	0,0018
ЭИ-698	1,8...2,0	—	$\leq 2,0$	—	—	—	0,0009	0,0014

Примечание. Содержание кислорода и азота в сплавах не регламентируется; данные по кислороду и азоту получены авторами.

держанием 50 об. %  $\gamma'$ -фазы на пластины толщиной 2,5...4,0 мм аналогичного химического состава (табл. 1).

При наплавке в качестве плазмообразующего, транспортирующего и защитного газа использовали аргон сорта 1 (ГОСТ 10157–79) со следующим содержанием примесей, мас. %: 0,002 O<sub>2</sub>; 0,001 H<sub>2</sub>O. Остаточное давление в баллоне составляло не менее 3 МПа. Расход газов был следующим: плазмообразующего 1, транспортирующего и защитного 6...7 л/мин. Скорость  $v_{св}$  перемещения плазмотрона равна 3 м/ч. В качестве присадочного материала использовали просушенный порошок фракции 40...160 мкм, полученный сухим распылением в атмосфере аргона. В качестве изменяющихся параметров процесса приняты расстояние от плазмотрона до изделия и масса порошка, подаваемого в дугу. Схема наплавки представлена на рис. 2. Для оценки влияния состояния присадочного порошка на содержание кислорода и азота в наплавленном металле выполнена наплавка валиков непросушенным и окисленным в дуге порошком. В последнем случае наплавку выполняли с целью оценки возможности повторного использования присадочного материала для сокращения его потерь.

Для исследований из наплавленного металла на высоте не менее 1 мм от основного металла электроэрозионной резкой вырезали образцы в форме куба со стороной 3...4 мм; их поверхность механически зачищали от оксидных пленок. Количественную оценку газосодержания наплавлен-

ного металла выполняли путем измерения полного содержания кислорода и азота путем восстановительной плавки в потоке газоносителя соответственно на установках RO316 и TN114 (фирма «Лесо»). Качество формирования наплавляемого металла определяли визуально по внешнему виду валика и оксидной пленки на его поверхности (рис. 3).

Результаты исследований содержания газов в наплавленном металле приведены на рис. 4–7. Установлено, что в зависимости от параметров процесса наплавки содержание кислорода в наплавленном металле составляет 0,007...0,022, а азота — 0,0026...0,008 мас. %. Качественное и удовлетворительное формирование наплавленного металла обеспечивается при массовой доле кислорода 0,007...0,017 % и азота 0,0026...0,0055 % в наплавленном металле. При этом содержание газов, внесенных в наплавленный металл непосредственно из порошка, составляет: кислорода не менее 0,007 мас. %; азота — не менее 0,0022 мас. %. Установлено, что технологическими параметрами, в значительной степени влияющими на содержание кислорода и азота в наплавленном металле, яв-

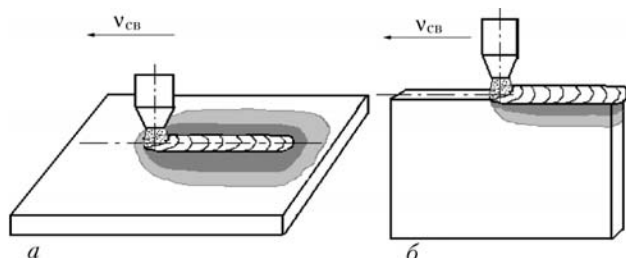


Рис. 2. Схемы микроплазменной порошковой наплавки на пластину (а) и ее торец (б)

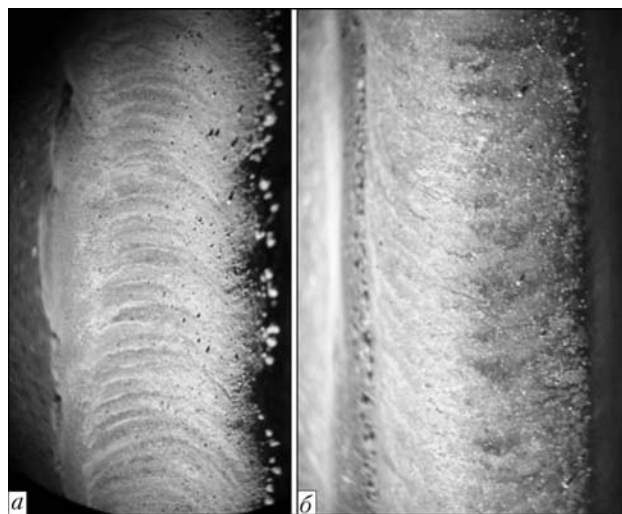


Рис. 3. Внешний вид (X10) наплавленных валиков жаропрочного никелевого сплава, содержащего 50 об. %  $\gamma'$ -фазы, с плохим (а) и удовлетворительным формированием (б)



Таблица 2. Свойства сварных соединений сплава ЭИ-698

Объект испытаний	$\sigma_B$ , МПа		$\sigma_T$ , МПа		$\delta$ , %		[O], мас. %	[N], мас. %
	20 °С	750 °С	20 °С	750 °С	20 °С	750 °С		
Основной металл	$\frac{1206}{1}$	$\frac{800}{1}$	$\frac{920}{1}$	$\frac{770}{1}$	$\frac{34}{1}$	$\frac{18}{1}$	0,0009	0,0014
Сварное соединение:								
№ 1	$\frac{973}{0,806}$	$\frac{726}{0,908}$	$\frac{600}{0,652}$	$\frac{490}{0,636}$	$\frac{30}{0,882}$	$\frac{17,2}{0,956}$	0,0060	0,0032
№ 2	$\frac{885}{0,774}$	$\frac{579}{0,723}$	$\frac{550}{0,598}$	$\frac{510}{0,662}$	$\frac{33}{0,971}$	$\frac{10}{0,556}$	0,0150	0,0079

Примечание. В знаменателе приведены значения коэффициента прочности для  $\sigma_B$ ,  $\sigma_T$ ,  $\delta$  относительно основного металла при указанной температуре.

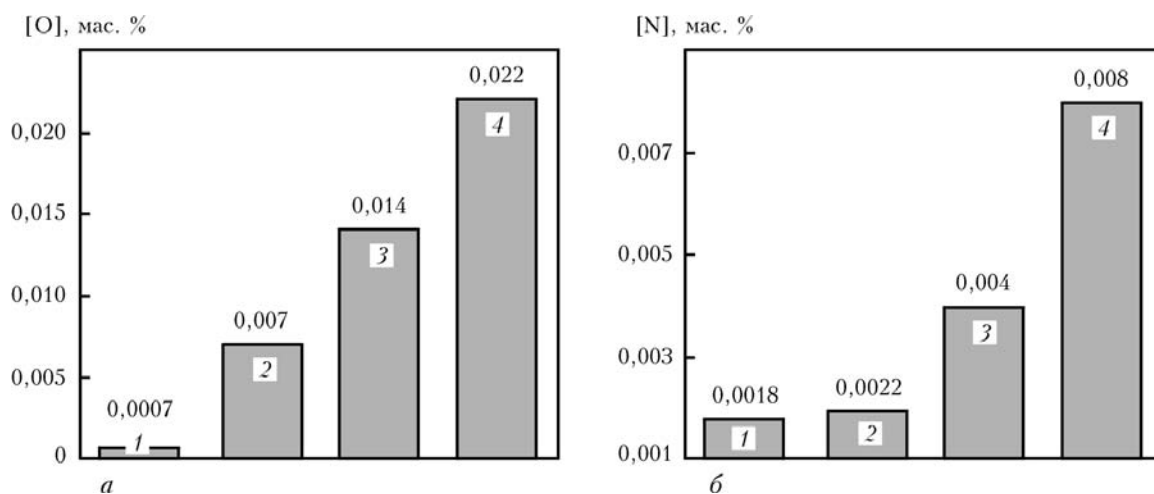


Рис. 4. Содержание кислорода (а) и азота (б) в металле жаропрочного никелевого сплава с 50 об. %  $\gamma'$ -фазы при многослойной наплавке с присадочным порошком в количестве 5 г/мин: 1 — литой сплав; 2 — присадочный порошок; 3, 4 — наплавленный металл, полученный при расстоянии между плазмотроном и изделием соответственно  $L = 4$  и 10 мм

ляются расстояние от плазмотрона до изделия, а также схема наплавки и количество присадочного порошка, подаваемого в дугу. Снижение массовой доли газов в наплавленном металле при наплавке на узкую подложку (торец пластины) объясняется тем, что соответствующие режимы наплавки отличаются незначительными расходом порошка и расстоянием от плазмотрона до изделия (около 3 мм).

Для исследования механических свойств сварных соединений жаропрочных никелевых сплавов с определенным выше диапазоном содержания кислорода и азота в металле шва выбран жаропрочный никелевый сплав ЭИ-698 (табл. 1, 2) с 14...17 об. %  $\gamma'$ -фазы [12] в состоянии поставки [13], который относится к категории трудносвариваемых и применяется для дисков и лопаток газовых турбин, работающих при температуре до 750 °С [13].

С целью исследований выполнена микроплазменная сварка двух жестких стыков из пластин размером 100×50×2,5 мм. Присадочный порошок из сплава ЭИ-698 фракции 40...160 мкм

подавался в количестве 7 г/мин. Скорость сварки составляла 3 м/ч. Технологические параметры микроплазменной сварки в экспериментах подбирали таким образом, чтобы обеспечить минимальное и максимальное содержание кислорода, азота в металле шва. Для удовлетворительного формирования шва при максимальном содер-

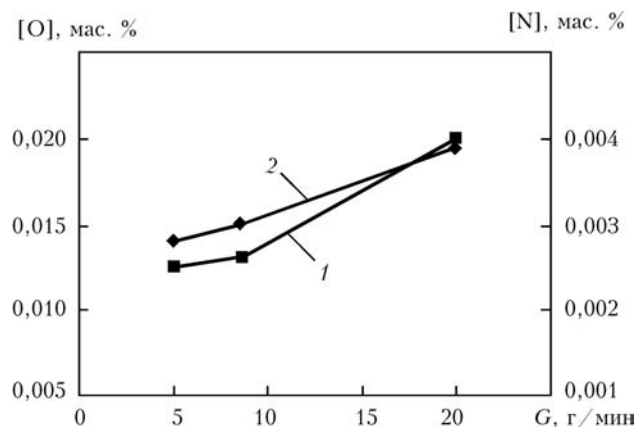


Рис. 5. Зависимость содержания кислорода (1) и азота (2) в наплавленном металле жаропрочного сплава с 50 об. %  $\gamma'$ -фазы от количества присадочного порошка, подаваемого в дугу

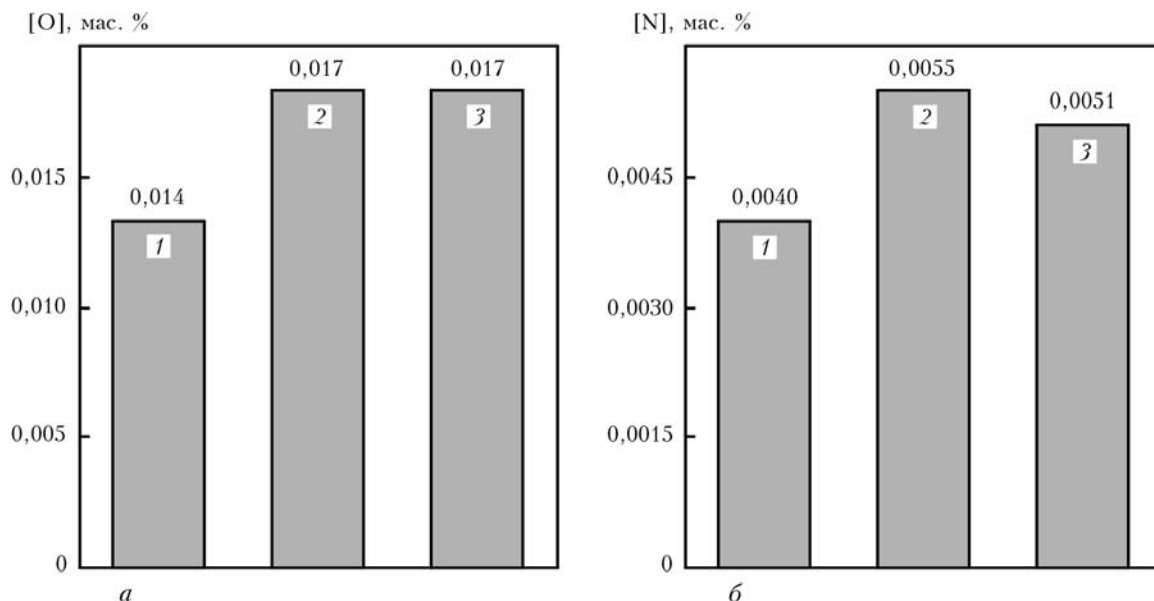


Рис. 6. Содержание кислорода (а) и азота (б) в наплавленном металле жаропрочного никелевого сплава с 50 об. %  $\gamma'$ -фазы в зависимости от состояния присадочного порошка, подаваемого в дугу, при многослойной наплавке в количестве 5 г/мин: 1 — порошок просушенный; 2 — без просушки; 3 — окисленный в дуге

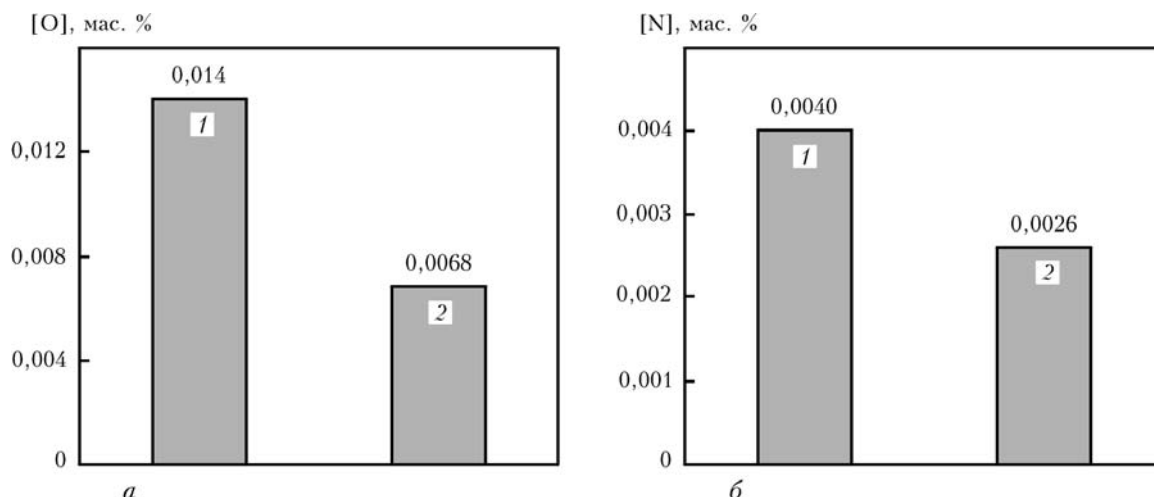


Рис. 7. Содержание кислорода (а) и азота (б) в наплавленном металле жаропрочного никелевого сплава с 50 об. %  $\gamma'$ -фазы в зависимости от схемы многослойной наплавки с присадочным порошком в количестве 5 г/мин на пластину (1) и ее торец (2)

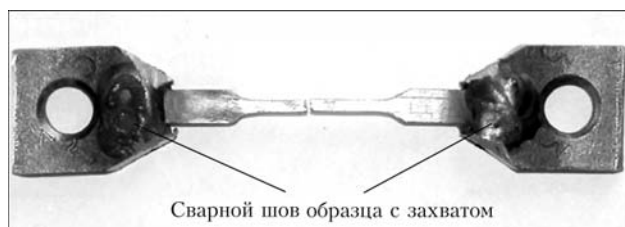


Рис. 8. Внешний вид составного сварного образца после испытаний на кратковременные механические свойства

жании газов в металле шва сварочный ток увеличили на 30 %, скорость сварки при этом оставалась неизменной.

Механические свойства сварных соединений в состоянии после сварки оценивали на установке «АЛА-ТОО» [8] при испытаниях составных сварных образцов, вырезанных поперек шва с сечением рабочей части 1,5×2 мм (рис. 8). Поверх-

ность образца перед испытаниями контролировалась методом цветовой дефектоскопии на наличие дефектов. Нагрев образца во избежание влияния кислорода из воздуха осуществляли радиационным способом в вакууме. Для исключения влияния масштабного фактора оценены кратковременные механические свойства основного металла. Испытания выполняли при температуре 20 и 750 °С. Выбор такой температуры обусловлен температурными условиями эксплуатации сплава [13], а также наличием для данного класса материалов температурного интервала провала пластичности [8], в котором особенно проявляется склонность к образованию трещин в сварных соединениях. Разрушение образцов наблюдалось по металлу шва. Результаты испытаний приведены в табл. 2.



Установлено, что при температуре 750 °С предел прочности на разрыв образца сварного соединения № 1 с минимальным содержанием кислорода и азота в металле шва на 20 % превышает соответствующую характеристику образца № 2 с максимальным содержанием кислорода и азота. При этом пластичность образца № 1 при 750 °С практически сохраняется на уровне основного металла, а образца № 2 при той же температуре составляет только 55,6 % пластичности основного металла при 750 °С.

Полученные данные хорошо согласуются с результатами проведенных ранее металлографических исследований [1, 2]. Понижение пластичности жаропрочных никелевых сплавов обусловлено обогащением границ зерен кислородом и образованием легкоплавких соединений с другими примесями элементами. В частности, это подтверждается данными оже-спектроскопии поверхности разрушения образца из поликристаллического никелевого жаропрочного сплава с 65 об. %  $\gamma'$ -фазы, испытанного в температурном интервале провала пластичности [2].

Повышение содержания кислорода и азота в металле шва снижает пластичность и предел прочности на разрыв сварных соединений в температурном интервале провала пластичности, что может негативно повлиять на трещиностойкость сварных соединений при сварке и термообработке.

Таким образом, при сварке (наплавке) жаропрочных никелевых сплавов с суммарным содержанием алюминия и титана более 3 мас. % возникает необходимость в усовершенствовании защиты зоны микроплазменной порошковой сварки.

1. *Строганов Г. Б., Чепкин В. М.* Литейные жаропрочные сплавы для газовых турбин. — М.: ОНТИ, МАТИ, 2000. — 128 с.
2. *Investigation of structure and crack formation in welded joints of single crystal Ni-base alloys / V. S. Savchenko, K. A. Yushchenko, A. Zvyagintseva et al.* // *Welding in the World*. — 2007. — 51, № 11/12. — P. 76–81.
3. *Машиностроение: Энциклопедия. Технология сварки, пайки и резки.* — В 40 т. — Т. III-4 / В. К. Лебедев, С. И. Кучук-Яценко, А. И. Четвертко и др.; Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 2006. — 768 с.
4. *Цинке М., Нойберт Г., Герольд Х.* Свойства сварных соединений жаропрочных сплавов на основе никеля // *Автомат. сварка.* — 1999. — № 4. — С. 35–38.
5. *Сорокин Л. И.* Заварка трещин с окисленной поверхностью на жаропрочных никелевых сплавах // *Свароч. пр-во.* — 2004. — № 12. — С. 30–31.
6. *Сорокин Л. И.* Аргонодуговая наплавка бандажных полок рабочих лопаток из высокожаропрочных никелевых сплавов // *Там же.* — 2004. — № 7. — С. 36–39.
7. *Особенности сварки высоконикелевых дисперсионно-твердеющих жаропрочных сплавов и ремонта изготавливаемых из них изделий / В. С. Савченко, К. А. Ющенко, Н. И. Саволей, А. В. Шавель* // *Автомат. сварка.* — 1993. — № 10. — С. 31–33.
8. *Исследование свариваемости никелевых суперсплавов и разработка технологии ремонта лопаток газовых турбин / К. А. Ющенко, В. С. Савченко, Л. В. Червякова и др.* // *Там же.* — 2005. — № 6. — С. 3–6.
9. *Ющенко К. А., Калина П. П., Яровицын А. В.* Особенности микроплазменной порошковой наплавки // *Там же.* — 2005. — № 4. — С. 9–16.
10. *Федоренко Г. А., Шведиков В. М., Грищенко Л. В.* О достоверности методов исследования струйной защиты // *Свароч. пр-во.* — 1986. — № 6. — С. 35–37.
11. *Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами / И. К. Походня, И. Р. Явдошин, А. П. Пальцевич и др.* — Киев: Наук. думка, 2004. — 446 с.
12. *Сорокин Л. И.* Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных сплавов // *Свароч. пр-во.* — 1999. — № 12. — С. 11–15.
13. *Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др.; Под ред А. С. Зубченко.* — М.: Машиностроение, 2003. — 784 с.

It has been established that increase in content of oxygen and nitrogen in weld metal has a negative effect on a working-temperature ductility of welded joints in heat-resistant nickel alloys. The quantitative range of oxygen and nitrogen content of the weld metal, which provides the quality weld formation and satisfactory properties of the welded joints, has been determined for repair microplasma powder welding.

Поступила в редакцию 21.03.2008