

## ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН ПРИ СВАРКЕ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ И НАПЛАВКЕ МОНЕЛЬ-МЕТАЛЛА НА СТАЛЬ

В. А. АНОШИН, В. М. ИЛЮШЕНКО, Е. П. ЛУКЬЯНЧЕНКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Исследовано влияние основных примесей на образование трещин при сварке медно-никелевых сплавов, в том числе при сварке и наплавке монель-металла на сталь. Методами оптической металлографии и электронно-фрактографического анализа установлено, что трещины носят межкристаллитный и кристаллизационный характер. Эмиссионным рентгеноспектральным анализом установлено значительное (в 27 раз) обогащение серой поверхности трещин, образующихся при сварке монель-металла. Показано, что кислород усиливает вредное действие серы при наплавке монель-металла в отличие от сварки низкоуглеродистой стали. Проведенные теоретические расчеты значительного обогащения границ зерен вредными примесями с малым коэффициентом распределения представляют интерес для объяснения причин образования кристаллизационных трещин на других никелевых сплавах. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 4.

*Ключевые слова:* медно-никелевые сплавы, вредные примеси, кристаллизационные трещины

Медно-никелевые сплавы, отличаясь повышенными механическими свойствами и высокой коррозионной стойкостью, широко применяются в морском судостроении и химическом машиностроении для изготовления деталей, работающих в различных агрессивных средах. Весьма перспективными являются сложнелегированные медно-никелевые сплавы, содержащие добавки таких элементов как алюминий, железо и марганец. В связи с этим актуальной является задача исследования свариваемости этих сплавов.

Настоящая работа является продолжением исследований по оценке влияния примесей на свариваемость меди [1], в частности, применительно к медно-никелевым сплавам, а также никель-медному сплаву монель-металл.

Предварительная оценка свариваемости опытных сплавов МНЖ5-1; МНАЖМц6-1,5-1-1; МНЖМцА13-1,5-3-1 проводилась по методике, разработанной в ИЭС им. Е. О. Патона с использованием образцов ЛТПМ и «рыбий скелет» [1].

Электронно-фрактографический и металлографический анализы поверхности трещин показали их межкристаллитный и кристаллизационный характер (рис. 1).

На рис. 2 представлена трещина по оплавленным границам зерен в околошовной зоне сплава МНЖМцА13-1,5-3-1. Методом эмиссионного рентгеноспектрального анализа установлено, что поверхности трещин обогащены вредными примесями (свинцом, фосфором, висмутом) в 3...5 раз. Для оценки влияния этих примесей на свариваемость сплава МНЖ5-1 были выплавлены опытные слитки с различным их содержанием.

Из этих слитков вырезались образцы для оценки склонности сплавов к образованию трещин. На рис. 3 представлена зависимость показателя  $K_{тр}$  для опытного сплава, содержащего различные концентрации висмута свинца, фосфора.

Изучена также склонность к образованию трещин при сварке и наплавке монель-металла марки НМЖМц28-2,5-1,5 на сталь. Сварка образцов из монель-металла производилась в среде аргона неплавящимся электродом по методике, указанной выше. Наплавка производилась на низкоуглеродистую сталь толщиной 20 мм под флюсом АН-26С стандартной проволокой марки НМЖМц28-2,5-1,5 диаметром 3 мм. Установлено, что характер трещин такой же, как и для медно-никелевых сплавов. Поверхность трещин в основном обогащена серой (в 27 раз). Проведенные расчеты по формуле Смита\* [2] (результаты приведены в таблице) также свидетельствуют о значительном обогащении границ зерен примесями по сравнению с исходной концентрацией  $C_0$  (например, серы с  $K_0 \approx 0,005$  для монель-металла).

Следует отметить, что при наплавке монель-металла на сталь под окисленным флюсом АН-18 наблюдается повышенная склонность к образованию трещин. Поэтому проведены опыты по изучению совместного влияния кислорода и серы на образование трещин по методике В. В. Подгаецкого [4]. На рис. 4 представлены результаты исследования совместного влияния кислорода

\* Необходимо отметить, что в формуле Смита, которая приведена в тексте работы [2] допущена ошибка: вместо коэффициента  $(2n - 1)$  должно быть  $(2n + 1)$ . Эта ошибка автоматически перешла в работы Н. Н. Прохорова [3, стр. 377] и др. авторов. В то же время в приложении к работе [2] формула записана правильно.

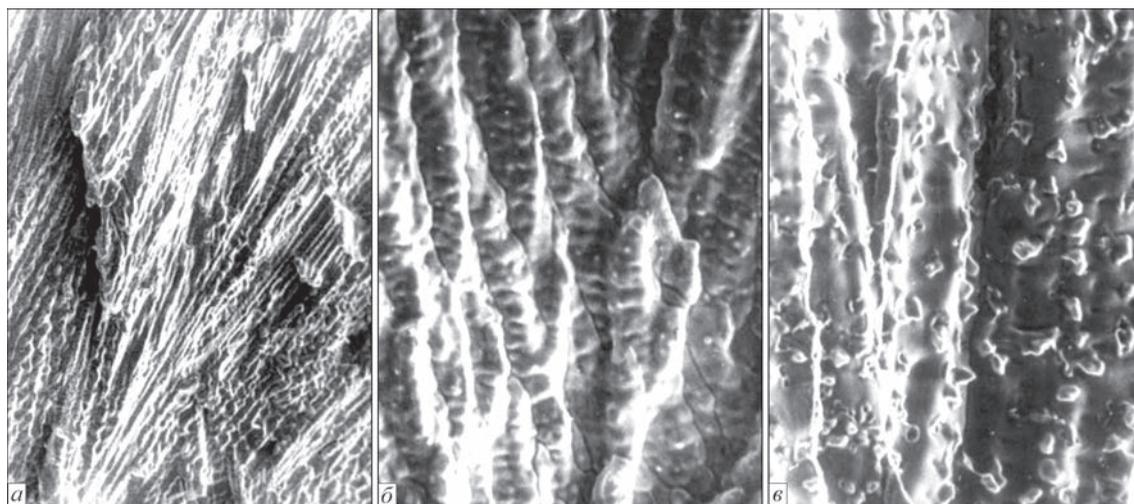


Рис. 1. Межкристаллитный (а, ×150) и кристаллизационный (б, ×800, в, ×1200) характер трещин при сварке монель-металла



Рис. 2. Трещина по оплавленным границам зерен в околошовной зоне сплава МНЖМцА13-1,5-3-1

и серы на образование трещин при наплавке монель-металла на сталь. Как видно из полученных данных, с увеличением содержания кислорода в шве уменьшается критическое содержание серы, при котором в швах возникают трещины. При больших концентрациях кислорода и малых содержаниях серы возникают микротрещины, которые не развиваются вследствие малого количества серы в металле шва. Учитывая, что химическое сродство к сере у меди и никеля при температурах кристаллизации больше чем у железа, при наплавке монель-металла более вероятно появление сульфидов  $Cu_2S$  и  $Ni_3S_2$ , которые образуют эвтектику с температурой плавления  $728\text{ }^\circ\text{C}$  или трой-

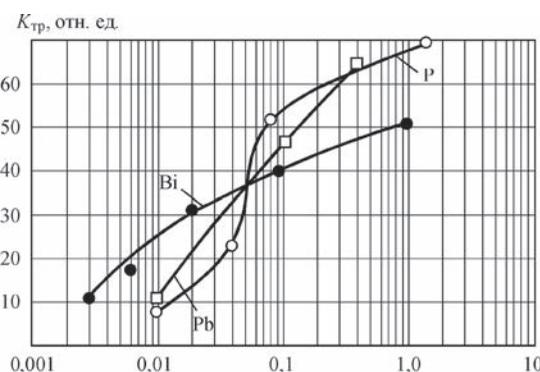


Рис. 3. Зависимость показателя  $K_{тр}$  для сплава МНЖ5-1 от концентрации висмута, свинца и фосфора в нем

ную эвтектику системы Ni–Cu–S. Введение кислорода еще больше снижает температуру эвтектики и, по-видимому, увеличивает поверхностную активность серы в отличие от низкоуглеродистой стали, где, как известно [4], кислород уменьшает вредное влияние серы на образование кристаллизационных трещин.

Фосфор оказывает такое же влияние, как и сера. При содержании фосфора в шве более 0,045 % появляются типичные межкристаллитные трещины как при наплавке на сталь, так и при сварке монель-металла.

При сварке никелевого сплава (INCONEL 690) кристаллизационные трещины также возникают из-за образования межзеренных жидких просло-

**Относительная сегрегация примеси на различном расстоянии  $X_2$  от границы зерен в зависимости от коэффициента распределения**

$v_{кр}, \text{ см/с}$	$C_{ТВ}(X_2)/C_0$											
	$K = 0,1$			$K = 0,02$			$K = 0,005$			$K = 0,001$		
	$X_2, \text{ см}$											
	$10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4}$
0,01	256,0	60,0	32,0	437,0	90,5	46,0	480,0	97,0	49,0	497,0	100,0	50,0
0,05	60,0	14,	8,0	90,5	19,0	10,0	97,0	20,0	10,0	100,0	20,3	10,3
0,1	32,0	8,0	4,0	46,0	10,0	5,0	49,0	10,0	5,3	50,0	10,3	5,3
0,5	8,0	2,0	1,3	10,0	2,3	1,4	10,0	2,3	1,4	10,3	2,4	1,4
1,0	4,0	1,3	1,0	5,0	1,4	1,0	5,3	1,4	1,0	5,3	1,4	1,0

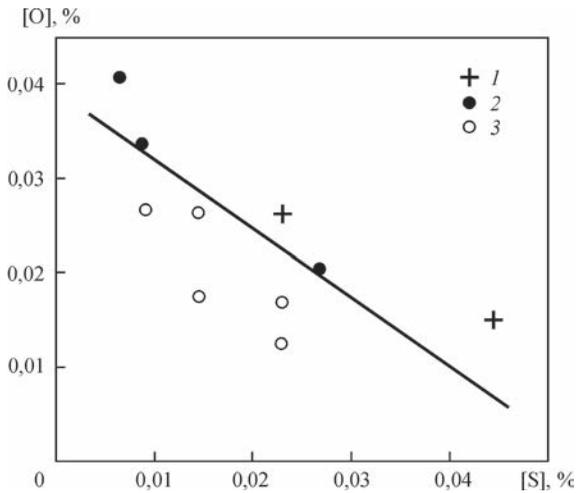


Рис. 4. Совместное влияние содержания серы и кислорода в металле шва на образование трещин при наплавке монель-металла на сталь: 1 — трещины; 2 — микротрещины; 3 — трещин нет

ек [5], на наш взгляд, также обогащенных серой из-за малого коэффициента  $K_o^S \approx 0,001$  в никеле. Таким образом, результаты проведенных экспериментов показывают, что изученные элементы (висмут, свинец, фосфор) увеличивают склонность швов к образованию трещин при сварке медно-никелевых сплавов и серы в монель-металле. Являясь поверхностно-активными элементами, они снижают деформационную способность кристаллизующегося металла [6], и, вследствие проявления эффекта адсорбционного понижения пластичности и прочности, вызывают образование кристаллизационных трещин.

**Выводы**

1 Исследовано влияние основных примесей (свинца, фосфора, висмута) на склонность медно-никелевых сплавов к образованию горячих трещин, установлен их межкристаллитный характер. Показано значительное обогащение серой (в 27 раз) поверхности трещин при сварке монель-металла.

2. Установлено, что кислород при сварке и наплавке монель-металла в отличие от низкоуглеродистой стали усиливает вредное действие серы.

3. Подтверждено, что вредные примеси, как и при сварке меди, являясь поверхностно-активными элементами, вследствие проявления эффекта адсорбционного понижения пластичности и прочности, вызывают образование кристаллизационных трещин.

**Список литературы**

1. Аношин В. А., Илюшенко В. М., Бондаренко А. Н. и др. (2014) Комплексная оценка влияния основных примесей на свариваемость меди. *Автоматическая сварка*, **11**, 27–30.
2. Smith V. G., Tiller W. A., Rutter G. W. (1955) A mathematical of solute redistribution during solidification. *Canad. J. Phys.*, **33**, **1**, 723–745.

3. Прохоров Н. Н. (1968) *Физические процессы в металлах при сварке. Т. 1. Элементы физики металлов и процесс кристаллизации*. Москва, Metallurgiya.
4. Подгаецкий В. В., Парфессо Г. И. (1977) Трещины сульфидного происхождения при сварке стали. Киев, Наукова думка.
5. Ющенко К. А., Савченко В. С., Червяков Н. О. (2011) Сравнительная оценка чувствительности к образованию горячих трещин сварных соединений сплава INCONEL 690. *Автоматическая сварка*, **11**, 4–10.
6. Аношин В. А., Гуревич С. М., Илюшенко В. М., Баранова В. Н. и др. (1981) Влияние поверхностноактивных элементов на деформационную способность никеля и монель-металла. *Там же*, **7**, 46–48.

**References**

1. Anoshin, V.A., Ilyushenko, V.M., Bondarenko, A.N. et al. (2014) Integrated evaluation of effect of main impurities on weldability of copper. *The Paton Welding J.*, **11**, 24-27.
2. Smith, V.G., Tiller, W.A., Rutter, G.W. (1955) A mathematical of solute redistribution during solidification. *Canad. J. Phys.*, **33**(2), 723-745.
3. Prokhorov, N.N. (1968) *Physical processes in metals during welding. Vol. 1: Elements of physics of metals and solidification process*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Podgaetsky, V.V., Parfesso, G.I. (1977) *Cracks of sulfide origin in welding of steel*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
5. Yushchenko, K.A., Savchenko, V.S., Chervyakov, N.O. et al. (2011) Comparative evaluation of sensitivity of welded joints on alloy Inconel 690 to hot cracking. *The Paton Welding J.*, **11**, 2-7.
6. Anoshin, V.A., Gurevich, S.M., Ilyushenko, V.M., Baranova, V.N. et al. (1981) Effect of surface-active elements on deformation capacity of nickel and monel. *Avtomatich. Svarka*, **7**, 46-48 [in Russian].

В. А. Аношин, В. М. Илюшенко, С. П. Лук’яненко

ІЕЗ ім. С. О. Патона НАН України.  
03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

**ВПЛИВ ОСНОВНИХ ДОМІШОК НА УТВОРЕННЯ ТРІЩИН ПРИ ЗВАРЮВАННІ МІДНО-НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ І НАПЛАВЛЕННІ МОНЕЛЬ-МЕТАЛУ НА СТАЛЬ**

Досліджено вплив основних домішок на утворення тріщин при зварюванні мідно-нікелевих сплавів, в тому числі під час зварювання і наплавлення монель-металу на сталь. Методами оптичної металографії і електронно-фрактографічного аналізу встановлено, що тріщини носять міжкристалітний і кристалізаційний характер. Емісійним рентгеноспектральним аналізом встановлено значне (в 27 разів) збагачення сіркою поверхні тріщин, що утворюються при зварюванні монель-металу. Показано, що кисень посилює шкідливу дію сірки при наплавленні монель-металу на відміну від зварювання низьковуглецевої сталі. Проведені теоретичні розрахунки значного збагачення границь зерен шкідливими домішками з малим коефіцієнтом розподілу представляють інтерес для пояснення причин утворення кристалізаційних тріщин на інших нікелевих сплавах. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 4.

*Ключові слова:* мідно-нікелеві сплави, шкідливі домішки, кристалізаційні тріщини

V. A. Antonov, V. M. Il'yashenko and E. P. Lyubchik

E. O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine  
11 Kazimir Malevich str., 03150, Kiev.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

EFFECT OF BASIC ADDITIVES ON FORMATION OF CRACKS IN WELDING OF COPPER-NICKEL ALLOYS AND SURFACING OF MONEL ON STEEL

Effect of basic additives on formation of cracks in welding of copper-nickel alloys, including in welding and surfacing of monel-metal on steel, was investigated. Methods of optical metallography

and electron-fractography analysis determined that the cracks have intragranular and solidification nature. Emission X-ray spectrum analysis determined significant (27 times) enrichment of gray surface of crack from monel weld. It is shown that oxygen intensifies detrimental effect of sulfur in monel surfacing in contrast to welding of low-carbon steel. Carried out detailed calculations of significant saturation of boundaries of grains with detrimental impurities with small coefficient of distribution are of interest for explaining the reason of solidification crack formation in high alloy. Ref., 1 Tab., 4 Fig

Keywords: copper-nickel alloys, detrimental impurities, solidification cracks

Поступила в редакцию 28.02.2018



**Международный балтийский форум DVS и GSI  
«Мобильность через постоянное обучение и четвертая  
промышленная революция «Индустрия 4.0»**

7–8 июня 2018

г. Таллинн

**Тематика**

- Новые директивы Международного института сварки по квалификации сварочного надзорного персонала. Новые цели обучения и компетентность
- Вопросы квалификации специалистов в области технологий соединения с учетом конкретных требований к сварке и склеиванию
- Индустрия 4.0
- Инновационное производство

**Контакты: Лариса Кантор, e-mail: larissa.kantor@qsi-boltikum.ee**

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«Титан 2018: производство и применение в Украине»**

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 11–13 июня 2018 г.

Председатели программного комитета:  
академик Б. Е. Патон, проф. В. А. Богуслаев



Национальная академия наук Украины  
Институт электросварки им. Е. О. Патона НАНУ  
АО «Мотор Сич»  
Запорожский национальный технический университет  
Международная Ассоциация «Сварка»



**Тематика конференции**

- Применение изделий и конструкций из титановых сплавов в авиа-двигателестроении и других отраслях промышленности.
- Литейные технологии.
- Аддитивные технологии в производстве изделий из титановых сплавов.
- Новые сплавы на основе титана и его интерметаллидных соединений.
- Прогрессивные технологии и оборудование для получения слитков титана и сплавов на его основе.
- Деформационная обработка титана.
- Структура и свойства титановых сплавов.
- Прогрессивные технологии сварки и пайки изделий из титановых сплавов.

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ,  
ул. Казимира Малевича, 11,  
г. Киев, 03150, Украина.  
Тел./факс: (38044) 200-82-77, 200-81-45, 205-22-98  
E-mail: journal@paton.kiev.ua, lanagr@gmail.com  
www.pwi-scientists.com/rus/titan2018



Информационная поддержка – журналы  
«Автоматическая сварка»  
и «Современная электрометаллургия».