

# Исследование процессов высокотемпературного изнашивания наплавленных сплавов\*

Артемьев А.А., Зорин И.В., Соколов Г.Н.

Волгоградский государственный технический университет  
г. Волгоград, Российская Федерация

[Artspace5@yandex.ru](mailto:Artspace5@yandex.ru)

**Аннотация.** Разработаны экспериментальные установки и методики экспресс-испытаний наплавленных сплавов на стойкость к газоабразивному изнашиванию при температуре до 1000 °С, а также – к изнашиванию металла по металлу через абразивную прослойку при температуре до 500 °С. Изучены особенности высокотемпературного изнашивания полученных электродуговой наплавкой экспериментальных сплавов на основе алюминидов никеля (10X4H76M3B3Ю11РЦ), а также на никелевой основе (ХЗН50МВ5Ю9ТТ4). Установлено, что износ сплава 10X4H76M3B3Ю11РЦ обусловлен многократной пластической деформацией тонких поверхностных слоев металла при соударении с абразивными частицами, сопровождающейся отделением микростружки, а также интенсивным окислением железа, входящего в состав сплава.

**Ключевые слова:** наплавленный сплав, электродуговая наплавка, абразивное изнашивание, высокотемпературные испытания.

## ВВЕДЕНИЕ

Известно, что наплавленные никелевые и интерметаллидные сплавы, в частности на основе легированного алюминидов никеля обладают высокой стойкостью к пластической деформации при температурах до 1250 °С [1]. Повышению эксплуатационных свойств наплавленного металла данных типов способствует его легирование микро- и ультрадисперсными частицами тугоплавких химических соединений (WC, ZrB<sub>2</sub>, TiB<sub>2</sub> и др.), вводимых в расплав сварочной ванны в составе электродных проволок [2, 3]. Однако вопросы стойкости таких сплавов в условиях высокотемпературного абразивного изнашивания изучены недостаточно.

В процессе разработки новых термо- и абразивостойких сплавов встает вопрос экспресс-оценки их эксплуатационных свойств в сравнении с промышленно выпускаемыми аналогами. При этом стандартизированные методики испытаний материалов на газоабразивное изнашивание при повышенной температуре отсутствуют, а экспериментальные [4-6] – имеют существенные эксплуатационные ограничения, не позволяющие в полной мере моделировать реальные условия работы деталей.

Цель работы – разработка методики экспресс-испытаний сплавов на стойкость к газоабразивному изнашиванию при температуре до 1000 °С и исследование процесса изнашивания наплавленного сплава 10X4H76M3B3Ю11, легированного 1,5 масс. % частиц ZrB<sub>2</sub>.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы сплавов 10X4H76M3B3Ю11РЦ и ХЗН50МВ5Ю9ТТ4 (железо – остальное) получали электродуговой наплавкой расщепленным электродом в среде аргона на пластины из низкоуглеродистой стали [7]. В качестве электрода использовали композиционные проволоки диаметром 3 мм, расположенные поперек направления наплавки на межосевом расстоянии равном 8 мм. Наплавку производили с использованием промышленного сварочного автомата А6 MasterTrack (ESAB).

Для проведения испытаний наплавленного металла разработана и изготовлена установка (см. рис. 1), принцип действия которой основан на ускорении абразивных частиц потоком сжатого воздуха и их соударении с поверхностью образца металла, расположенного под углом 30°.

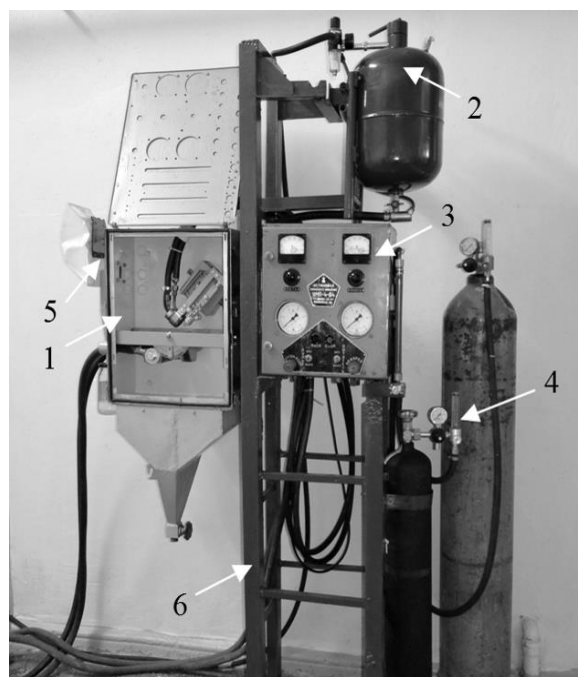


Рис. 1. Установка для испытаний на газоабразивное изнашивание:

1 – герметичная испытательная камера; 2 – система подачи абразивного материала; 3 – блок управления плазмотроном; 4 – система подачи плазмообразующих газов; 5 – система воздухоочистки; 6 – станина

\* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-практической конференции "Материаловедение и металлургические технологии" (RusMetalCon-2018), <https://rusmetalcon.susu.ru>

Образец нагревали проходящим через него током от сварочного источника ВДУ-1000. Поток воздуха, содержащего частицы кварцевого песка со средним размером 400 мкм, подогревали струей аргоно-азотной плазмы, генерируемой плазмотроном, питающимся от источника тока ВДУ-504 [8]. Варьирование скорости соударения абразива с поверхностью исследуемого образца осуществляется за счет изменения давления воздуха на входе в сопло в диапазоне от 0,2 до 0,6 МПа, что позволяет в широких пределах управлять кинетической энергией абразивных частиц. При испытаниях давление устанавливали равным 0,3 МПа.

Испытания на изнашивание через абразивную прокладку при температуре 500 °С проводили на лабораторной установке [9, 10], состоящей из вращающегося контртела, на поверхности которого находится абразивная масса (смесь электрокорунда и железной окалины в соотношении 1:1 с размером частиц 100...250 мкм), и прижатого к нему неподвижного образца металла, закрепленного в токоподводящем держателе (рис. 2).

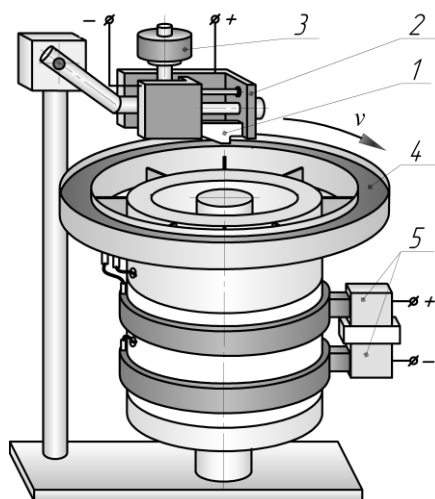


Рис. 2. Принципиальная схема установки для испытаний на абразивное изнашивание:

1 – образец для испытаний; 2 – токоподводящий держатель; 3 – груз; 4 – контртело с нагревателем; 5 – скользящие токоподводы;  $v$  – направление вращения контртела

Нагрев контртела (кольцо из стали 12Х18Н9Т) осуществлялся посредством электрического нагревателя сопротивления, расположенного под ним и запитанного через скользящие токоподводы от источника постоянного тока. Образец, закрепленный в медном токоподводящем держателе, нагревался за счет проходящего через него тока от сварочного источника.

Структуру и элементный состав структурных составляющих наплавленного металла изучали с использованием оптического (Carl Zeiss Axiovert 40 MAT) и двулучевого электронно-ионного (FEI Versa 3D с системой микрорентгеноспектрального анализа) микроскопов.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что наплавленный металл 10Х4Н76М3В3Ю11РЦ состоит из твердых растворов на основе  $\gamma$ -Ni<sub>3</sub>Al фаз, образовавшихся в ходе эвтектической

реакции из первичных  $\gamma$ -дендритов и в ходе перитектической реакции с участием  $\gamma$ -твердого раствора. При этом размер структурных составляющих эвтектики не превышает 10-15 мкм, а крупных частиц упрочняющих фаз в металле не обнаружено.

Установлено, что на изношенной поверхности образца металла располагаются лунки размером 30...80 мкм, сформировавшиеся в результате многократного воздействия абразивных частиц. С использованием ионного травления поверхности металла на глубину до 30 мкм получены поперечные сечения лунок, анализ которых показал, что в результате высокоскоростного соударения с абразивной частицей металл подвергается пластической деформации с образованием микростружки (рис. 3). Причем степень деформации, достаточная для проскальзывания и поворота микрообъемов кристаллов, достигается в поверхностном слое толщиной до 2,5 мкм, что проявляется в появлении характерной полосчатой структуры металла (полос сброса). Исследование сечений поверхностного слоя на обратной стороне испытанного образца металла наличие подобной структуры не выявило.

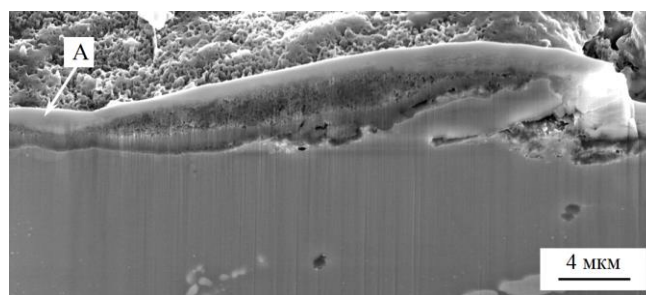


Рис. 3. Сечение поверхностного слоя образца наплавленного металла 10Х4Н76М3В3Ю11РЦ после испытания на газоабразивное изнашивание при температуре 1000 °С (А – напыленный слой платины)

Таким образом, небольшая глубина внедрения абразивных частиц в поверхность металла при малых углах атаки газоабразивного потока обуславливает определенные требования к структуре износостойкого сплава. Первостепенное значение приобретает твердорастворный, а также интерметаллидный механизм упрочнения металла ультрадисперсными твердыми фазами, равномерно распределенными в микрообъемах твердого раствора. Этому способствует легирование сплава частицами ZrB<sub>2</sub>. Так, цирконий, образовавшийся вследствие диссоциации частиц ZrB<sub>2</sub>, легирует твердый раствор, повышая его высокотемпературную прочность, а также, наряду с W и Mo, способствует формированию субмикро- и наноразмерных (50-100 нм) интерметаллидных фаз, армирующих твердый раствор. Бор равномерно распределяется по структуре металла без образования легкоплавких боридных эвтектик по границам зерен, что предотвращает их разупрочнение в процессе высокотемпературных нагревов.

Установлено, что помимо абразивного износа, поверхность металла подвергается окислительному изнашиванию вследствие высокотемпературного взаимодействия с кислородом воздуха. При этом формируются гетерогенные слои оксидов толщиной от 0,5 до 2 мкм: первый – прилегающий к поверхности металла слой оксида Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;

второй – слой оксидов на основе  $Fe_xO_y$ ; третий – наружный пенообразный слой сложных оксидов Fe, Al, Ni, Cr. На различных участках образца отдельные слои оксидов могут отсутствовать. Это связано с тем, что ударное воздействие абразивных частиц приводит к перемешиванию оксидных слоев и отделению их с поверхности металла в виде «чешуек», которые фиксируются на изношенной поверхности образца.

Испытаниями сплавов на никелевой основе, в частности ХЗН50МВ5Ю9ТТ4, в условиях абразивного воздействия частиц электрокорунда при температуре 500 °С выявлено экстремально низкое в сравнении со сплавами на основе железа падение их механических свойств. Твёрдость таких сплавов в диапазоне температур 20–500 °С снижается не более, чем на 10%, что в совокупности со значительным падением микротвёрдости абразива (например, микротвёрдость  $Al_2O_3$  при нагреве до 500 °С падает в 1,7 раза [11]) предопределяет их высокое сопротивление абразивному изнашиванию по сравнению с промышленными (25Х5ФМС, 350Х22М3Ф) и экспериментальными (300Х13М2ТНР) сплавами на основе железа (рис. 4).

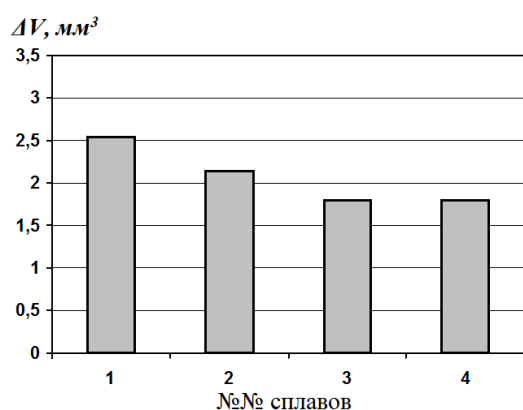


Рис. 4. Потеря массы образцов наплавленных сплавов после испытаний на абразивное изнашивание при температуре 500 °С: 1 – 25Х5ФМС; 2 – 350Х22М3Ф; 3 – 300Х13М2ТНР; 4 – ХЗН50МВ5Ю9ТТ4

Очевидно, при дальнейшем повышении температуры испытаний преимущество никелевых сплавов окажется еще более значительным, что может сделать их применение экономически целесообразным.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Износ наплавленного металла 10Х4Н76М3В3Ю11РЦ при температуре 1000 °С носит комплексный окислительно-абразивный характер. Сопротивлению металла пластической деформации при ударном воздействии абразивных частиц способствует твердорастворное упрочнение сплава, а также его армирование ультрадисперсными интерметаллидными фазами, формирующимися при его легировании тугоплавкими химическими элементами. Для уменьшения доли окислительной составляющей в износе сплава необходимо значительно снижать содержание в нем железа, переходящего в сварочную ванну из стальной основы.

Повышенная стойкость сплавов на основе алюминидов никеля к пластическому деформированию в условиях высокотемпературного газоабразивного изнашивания обуславливает перспективность их применения для упрочнения деталей энергетических газотурбинных установок и газоперекачивающих агрегатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Структура сварного соединения направленно кристаллизованного сплава на основе  $Ni(3)Al$  / И.В. Зорин, Г.Н. Соколов, Ю.Н. Дубцов и т.д. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2014. – №2. – С. 35-40.
2. Особенности формирования структуры и свойств наплавленных сплавов под влиянием наночастиц тугоплавких соединений / Г.Н. Соколов, И.В. Зорин, А.А. Артемьев и т.д. // Физика и химия обработки материалов. – 2014. – №2. – С. 38-47.
3. Феноменологическая модель формирования центров кристаллизации в металлическом расплаве при сварке под влиянием ультрадисперсных тугоплавких компонентов / Г.Н. Соколов, В.И. Лысак, И.В. Зорин и т.д. // Вопросы материаловедения. – 2015. – №4. – С. 159-168.
4. Жудра А.П. Исследование износостойкости композиционных сплавов в условиях газоабразивного износа при повышенных температурах // Автоматическая сварка. – 2014. – №11. – С. 31-34.
5. Юзвенко Ю.А. Установка для оценки износостойкости наплавленного металла при газо-абразивной эрозии / Ю.А. Юзвенко, В.А. Гавриш // Автоматическая сварка. – 1972. – №6. – С. 73-74.
6. Manish R. Erosion-Oxidation Interaction in Ni and Ni-20Cr Alloy / R. Manish, K.K. Ray, G. Sundararajan // Metallurgical and materials transactions A. – 2001. – №32A. – P. 431-451. DOI: 10.1007/s11661-001-0232-5
7. Влияние параметров наплавки расщеплённым электродом на формирование наплавленного металла системы Ni – Cr – Mo – Nb / С.К. Елсуков, И.В. Зорин, Г.Н. Соколов и др. // Известия ВолгГТУ. Серия "Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении". – 2018. – №3 (213). – С. 102-108.
8. Методика испытаний наплавленного металла на газоабразивное изнашивание / А.А. Артемьев, Г.Н. Соколов, И.В. Зорин и др. // Известия ВолгГТУ. Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении. – 2018. – №3 (213). – С. 112-116.
9. Методика испытаний наплавленных сплавов на стойкость к высокотемпературному абразивному изнашиванию / А.А. Артемьев, А.А. Антонов, Г.Н. Соколов, В.И. Лысак // Трение и износ. – 2017. – Т. 38, №3. – С. 247-254.
10. Антонов А.А., Артемьев А.А., Соколов Г.Н., Лысак В.И. Установка для испытания материалов на абразивное изнашивание // Патент РФ №2564827. 2015.
11. Семенов А.П. Трибологические свойства тугоплавких оксидов и неметаллических соединений при высоких температурах. Часть 1. Оксиды // Трение и износ. – 2008. – Т.29, №5. – С. 531-549.

# Investigation of the Processes of High-Temperature Wear of Welded Alloys

Artem'ev A.A., Zorin I.V., Sokolov G.N.

Volgograd State Technical University

Volgograd, Russian Federation

[artspace5@yandex.ru](mailto:artspace5@yandex.ru)

**Abstract.** Experimental facilities and methods for express testing of welded alloys for resistance to gas-abrasive wear at a temperature of up to 1000 °C have been developed, as well as for metal wear on metal through an abrasive layer at temperatures up to 500 °C. The peculiarities of high-temperature wear of experimental alloys based on nickel aluminide (10Cr4Ni76Mo3W3Al11BZr), and also on a nickel basis (Cr3Ni50MoW5Al9Ta4), obtained by electric arc surfacing, are studied. It is established that the wear of the alloy 10Cr4Ni76Mo3W3Al11BZr is caused by repeated plastic deformation of thin surface layers of metal in collision with abrasive particles, accompanied by the separation of the micro-strand, as well as by intensive oxidation of iron, which is part of the alloy.

**Keywords:** welded alloy, electric arc surfacing, abrasive wear, high temperature tests.

## REFERENCES

1. Zorin I.V., Sokolov G.N., Dubtsov Yu.N. et al. The structure of the welded joint of a directionally crystallized alloy based on Ni(3)Al [Struktura svarnogo soedineniya napravlenno kristallizovannogo splava na osnove Ni(3)Al], *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Metal Science and Heat Treatment]*, 2014, no.2, pp. 35-40. (in Russ.)
2. G.N. Sokolov, I.V. Zorin, A.A. Artemyev et al. Features of the formation of the structure and properties of the deposited alloys under the influence of nanoparticles of refractory compounds [Osobennosti formirovaniya struktury i svoystv naplavlennykh splavov pod vliyaniem nanochastits tugoplavkikh soedineniy], *Fizika i khimiya obrabotki materialov [Physics and chemistry of processing materials]*, 2014, no.2, pp. 38-47. (in Russ.)
3. Sokolov G.N., Lysak V.I., Zorin I.V. et al. Phenomenological model of crystallization center nucleation in metal melt during welding under the influence of ultrafine refractory components, *Inorganic Materials: Applied Research*, 2016, vol. 7, is. 6, pp. 884-891. DOI: 10.1134/S2075113316060204
4. Zhudra A.P. Investigation of wear resistance of composite alloys under the conditions of gas-abrasive wear at elevated temperatures [Issledovanie iznosostoykosti kompozitsionnykh splavov v usloviyakh gazoabrazivnogo iznosa pri povyshennykh temperaturakh], *Avtomaticheskaya svarka [Automatic Welding]*, 2014, no.11, pp. 31-34. (in Russ.)
5. Yuzvenko Yu.A., Gavrish V.A. Installation for assessing the wear resistance of the weld metal during gas-abrasive erosion [Ustanovka dlya otsenki iznosostoykosti naplavlennogo metalla pri gazo-abrazivnoy erozii], *Avtomaticheskaya svarka [Automatic Welding]*, 1972, no.6, pp. 73-74. (in Russ.)
6. Manish R., Ray K.K., Sundararajan G. Erosion-Oxidation Interaction in Ni and Ni-20Cr Alloy, *Metallurgical and materials transactions A*, 2001, vol. 32, is. 6, pp. 1431-1451. DOI: 10.1007/s11661-001-0232-5
7. Elsukov C.K., Zorin I.V., Sokolov G.N. et al. Influence of the parameters of surfacing by a split electrode on the formation of a deposited metal of the system Ni - Cr - Mo - Nb [Vliyanie parametrov naplavki rasshcheplyennym elektrodom na formirovanie naplavlennogo metalla sistemy Ni - Cr - Mo - Nb], *Izvestiya VolgGTU. Seriya "Problemy materialovedeniya, svarki i prochnosti v mashinostroenii" [News of VolgGTU. Series "Problems of materials science, welding and strength in mechanical engineering"]*, 2018, no.3 (213), pp. 102-108. (in Russ.)
8. Artemyev A.A., Sokolov G.N., Zorin I.V. et al. Testing procedure for weld metal for gas abrasive wear [Metodika ispytaniy naplavlennogo metalla na gazoabrazivnoe iznashivanie], *Izvestiya VolgGTU. Problemy materialovedeniya, svarki i prochnosti v mashinostroenii [News of VolgGTU. Problems of materials science, welding and strength in mechanical engineering]*, 2018, no.3 (213), pp. 112-116. (in Russ.)
9. Artemyev A.A., Antonov A.A., Sokolov G.N., Lysak V.I. Test procedure of clad alloys for resistance against high temperature abrasive wear, *Journal of Friction and Wear*, 2017, vol. 38, no.3, pp. 225-230. DOI: 10.3103/S1068366617030035
10. Antonov A.A., Artemyev A.A., Sokolov G.N., Lysak V.I. *Ustanovka dlya ispytaniya materialov na abrazivnoe iznashivanie* [Installation for testing materials for abrasive wear], Patent RF 2564827, 2015. (in Russ.)
11. Semenov A.P. Tribological properties of refractory oxides and non-metallic compounds at high temperatures. Part 1. Oxides [Tribologicheskie svoystva tugoplavkikh oksidov i nemetallicheskih soedineniy pri vysokikh temperaturakh. Chast' 1. Oksidy], *Trenie i iznos [Friction and wear]*, 2008, vol.29, no.5, pp. 531-549. (in Russ.)

## Библиографическое описание статьи

Артемьев А.А. Исследование процессов высокотемпературного изнашивания наплавленных сплавов / А.А. Артемьев, И.В. Зорин, Г.Н. Соколов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2018. – Т.6, №4. – С. 3-6. DOI: 10.24892/RIJIE/20180401

## Reference to article

Artem'ev A.A., Zorin I.V., Sokolov G.N. Investigation of the processes of high-temperature wear of welded alloys, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2018, vol.6, no.4, pp. 3-6. DOI: 10.24892/RIJIE/20180401