

# ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СТРОИТЕЛЬНОЙ, ДОРОЖНОЙ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Д. А. Зареченский, к.т.н., доцент; В. В. Воробьев; Н. А. Пестунова  
ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

**Аннотация:** Проанализированы материалы, рекомендуемые для восстановления и упрочнения рабочих элементов деталей строительной, дорожной и сельскохозяйственной техники. Определены технологические особенности электродуговой наплавки сплавов, применяемых для повышения износостойкости рабочих поверхностей деталей машин, работающих в условиях интенсивного абразивного и ударо-абразивного изнашивания. Рассмотрены пути повышения эксплуатационной стойкости деталей, упрочненных электродуговой наплавкой износостойкими сплавами. Исследовано влияние технологических параметров наплавки износостойких сплавов на характер образования и развития трещин, приводящих к отколам с поверхности детали в процессе наплавки и эксплуатации. Рекомендовано применение аустенитных наплавочных материалов для восстановления деталей из высокомарганцевых сталей перед наплавкой износостойкого слоя. Разработан температурный режим многослойной электродуговой наплавки высоколегированных сплавов порошковой проволокой, позволяющий получить благоприятный характер трещинообразования и снизить вероятность преждевременного износа упрочненной поверхности.

**Ключевые слова:** электродуговая наплавка, интенсивный ударо-абразивный износ, износостойкий сплав, карбидная фаза, характер трещинообразования, сколы наплавленного слоя.



**Зареченский**  
Денис Александрович



**Воробьев**  
Владимир Викторович



**Пестунова**  
Наталья Александровна

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для упрочнения и восстановления деталей, эксплуатируемых в условиях интенсивных ударных нагрузок и абразивного изнашивания, широко применяется электродуговая наплавка [1-6]. Наплавку деталей дробильного и размольного оборудования (конуса и била дробилок, броневых плит), работающих при ударных нагрузках, рекомендуют выполнять самоупрочняющимся высокомарганцевым сплавом типа 110Г13. Для деталей землеройного оборудования и сельхозтехники, контактирующих с мелкими абразивными частицами (почвообрабатывающие фрезы, диски культиваторов, лемеха плугов, лезвия скрепков, ковшей землечерпалок и экскаваторов), эффективно применяют высокоуглеродистые твердые сплавы типа высокохромистых чугунов. Детали строительной и дорожной техники (лопатки для смешивания асфальта, ножи и смесители цементной промышленности, подающие шнеки), контактирующие с абразивом при внешней статической и ударной нагрузке, упрочняют высокоуглеродистыми износостойкими сплавами с повышенной концентрацией карбидной фазы в наплавленном слое [7-9].

При восстановительном упрочнении рабочих органов машин, имеющих критический износ, основной технологической трудностью является повышенная хрупкость высокоуглеродистых сплавов, которая определяет предельную толщину износостойкого слоя [9-11]. Проявляется это в виде роста количества и раскрытия трещин, по мере увеличения высоты наплавленного слоя и соответствующей кон-

центрации износостойкой карбидной составляющей сплава [12,13]. Как показывает практика, увеличение раскрытия трещин интенсифицирует износ [12,15], а при ударных нагрузках по ним образуются отколы, выкрашивания и отслаивания наплавленного слоя от детали (рис.1).

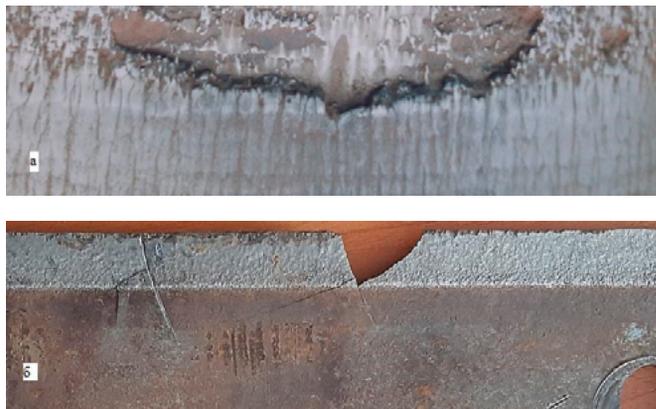


Рис. 1. Отколы износостойкого слоя, образовавшиеся на поверхности детали в результате интенсивного износа (а) и в результате удара (б)

Зарождение и развитие трещин при электродуговой износостойкой наплавке в основной металл деталей, изготовленных из марганцовистых или закаливающихся сталей, происходит под воздействием термодформационного цикла и является естественным свойством наплавляемых твердых сплавов [10,11,13]. В ряде случаев сплав с меньшей износостойкостью может показать более высокую эксплуатационную стойкость за счет качественных характеристик наплавленного слоя, к которым относятся характер ориентации и раскрытия трещин.

### ЦЕЛЬ

Целью настоящей работы являлось определение влияния технологических режимов электродуговой износостойкой наплавки на формирование и развитие трещин, которые при эксплуатации приводят к сколам наплавленного слоя, и разработка технологических рекомендаций по повышению эксплуатационного ресурса деталей машин при их восстановлении и упрочнении.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследований был выбран наплавочный материал в виде порошковой проволоки, обеспечивающий состав износостойкого наплавленного слоя типа 530X11Б7Ф6РС, рекомендованный для наплавки деталей, работающих при интенсивном удароабразивном износе [5, 6]. Наплавку выполняли на пластину из ст. 3 размером 450×150×18 мм наплавочным аппаратом АД-231 с источником питания КИУ-1201. Базовым режимом автоматической наплавки самозащитной порошковой проволокой Ø2,8 мм был выбран режим, рекомендованный производителем: постоянный ток обратной полярности  $I_n = 250-300A$ ;  $U_d = 35B$ ;  $V_n = 24$  м/ч; вылет – 25 мм.

Наплавку аустенитного подслоя на сталь 110Г13Л выполняли проволокой Св-08Х20Н9Г7Т Ø1,2 мм полуавтоматическим способом на аппарате А-547 в среде углекислого газа на оптимальном режиме. Температуру металла в процессе наплавочных работ контролировали пирометром DT-450.

Геометрические размеры наплавленных валиков измеряли штангенциркулем с цифровой индикацией «Digital» в их поперечном сечении после порезки пластины на темплеты. Величину раскрытия трещин определяли с помощью лупы измерительной ЛИ-10. Металлографический анализ проводили на микроскопе МИМ 7 при 50 и 100-кратном увеличении. Твердость по высоте наплавленного слоя измеряли микротвердомером ПМТ-3 при нагрузке 100 г.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой серии опытов изучали характер формирования износостойкого сплава и образование трещин в наплавленном слое при регулировании тепловой мощности электродуговой наплавки за счет изменения силы тока. При изменении силы тока остальные параметры режима не изменялись. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Как показали результаты исследований, увеличение силы тока наплавки увеличивает ширину валика, высоту усиления и глубину проплавления. Наиболее оптимальным значением силы тока являются 250–350А, так как при наплавке на токах ниже 200А и выше 400 А дуга горит нестабильно, увеличивается разбрызгивание и ухудшается формирование

Таблица 1.

Влияние силы тока наплавки на формирование износостойкого слоя

Сила тока, А	Глубина проплавления, мм	Ширина слоя, мм	Высота слоя, мм	Количество трещин, мм	Раскрытие трещин, мм	Высота мартенситно-карбидного слоя, мм
500	3,5	20,7	3,5-4	5	0,5-0,7	2,6
400	2,4	20,4	3-3,2	7	0,3-0,5	2,0
300	1,6	17,4	2-2,3	7	0,1-0,2	1,6
200	1,6	14,5	1,5-2	6	0,1	0,7

наплавленного слоя. Анализ характера трещинообразования показал, что с увеличением тепловой мощности дуги увеличивается раскрытие трещин при уменьшении их количества. Трещины ориентируются перпендикулярно валику или под углом 30-45°, что обусловлено переходом растягивающих напряжений в напряжения сжатия по мере охлаждения наплавленного слоя при удалении его от дуги.

С целью анализа условий развития трещин по высоте слоя были проведены металлографические исследования наплавленных образцов и измерение твердости. На поверхности наплавленных валиков твердость всех однослойных наплавов находится в пределах HRC 55-57. В результате металлографических исследований установлено, что чем больше раскрытие трещин на поверхности слоя, тем глубже они распространяются в его глубину, а отдельные трещины пересекают линию сплавления (рис. 2).

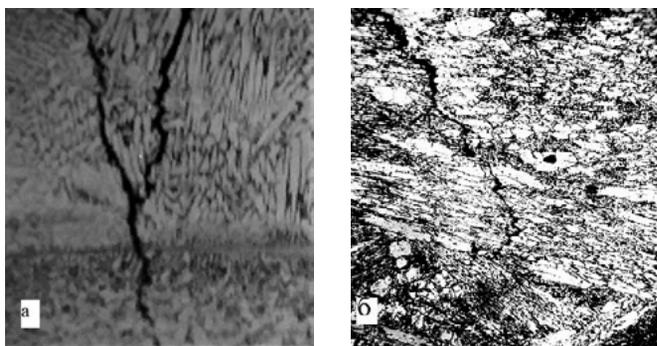


Рис. 2. Распространение трещин в микроструктуре наплавленного слоя (100) с переходом в основной металл (а) и по границам карбидной фазы (б)

Микроанализ показал, что от линии сплавления со стороны углеродистого металла расположен преимущественно феррит, а в наплавленном слое – мелкодисперсная аустенитно-мартенситная структура сменяется зоной, состоящей на 50 % из мартенсита (с микротвердостью 5038-5613 кгс/мм<sup>2</sup>) и карбидной эвтектики (микротвердость 8083-10762 кгс/мм<sup>2</sup>), по границам которой распространяется трещина. Размер мартенситно-карбидной зоны имеет прямо пропорциональную зависимость от высоты наплавленного износостойкого слоя (таблица 1).

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что наплавка порошковыми проволоками подобного типа сплавов при необходимости упрочнения поверхности на высоту более 2-х мм и ширину более 15 мм потребует нанесения дополнительных слоев, как по ширине, так и по высоте рабочей поверхности детали. Учитывая низкую стойкость к термоциклированию исследуемого типа износостойкого сплава и необходимость восстановления деталей из марганцовистых и закаляющихся сталей, важной научно-практической задачей является исключение перехода трещин из наплавленного слоя в основной металл и их горизонтальное распространение по зоне сплавления.

Для решения первого технологического вопроса были выполнены сравнительные исследования многослойной наплавки вышеуказанной порошковой про-

волокой на сталь 110Г13Л по двум технологическим вариантам: без предварительной наплавки промежуточного слоя и с наплавкой промежуточного аустенитного слоя. Как показал металлографический анализ, в металле обеих наплавов имеются трещины (рис. 3).

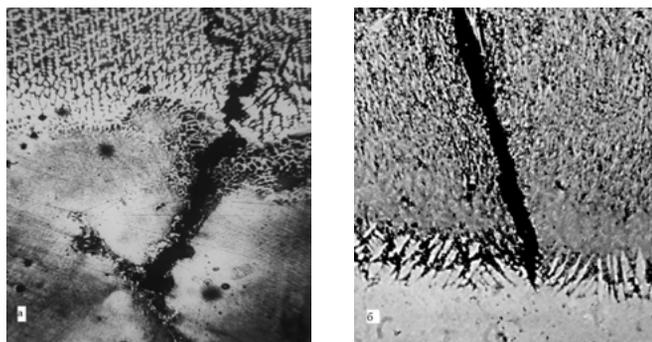


Рис. 3. Микроструктура зоны распространения трещины у линии сплавления износостойкого сплава со сталью 110Г13Л (а) и у линии сплавления с предварительно наплавленным аустенитным подслоем (б)

Большая часть трещин при наплавке без аустенитного подслоя пересекает линию сплавления и углубляется в основной металл на глубину до 4 мм. При наплавке на аустенитный подслоя трещины в нем гасятся и не переходят из наплавленного в основной металл, что подтверждает эффективность нанесения буферных слоев перед наплавкой износостойких сплавов. Наплавка подслоя обеспечивает необходимый запас пластических свойств металла в зоне, претерпевающей при охлаждении металла термомеханическую и структурную деформацию, предотвращая развитие трещин откола износостойкого слоя от основного металла.

При наплавке последующих слоев высоколегированного сплава на уже наплавленный первый износостойкий слой, состоящий из хрупких структур, исключается необходимый запас пластичности по зоне их сплавления. Поэтому для предупреждения образования горизонтальных трещин откола в многослойной износостойкой наплавке необходимо снизить уровень и перераспределить направление скальвающих напряжений. Регулирование температурного режима электродуговой наплавки позволяет управлять скоростью охлаждения металла и влиять на сопутствующие процессы структурообразования и термической деформации.

Для исследований влияния температурного режима наплавки на характер развития и распространения трещин в износостойком слое были наплавлены контрольные образцы, имитирующие упрочняющую наплавку рабочих органов деталей машин. Автоматическую наплавку образцов выполняли исследуемой выше порошковой проволокой на оптимальных параметрах режима в два слоя на пластину из стали 3 размером 450×150×18 мм с предварительно наплавленным аустенитным подслоем. Общая высота наплавки составила 8 мм. Регулирование температурного режима наплавки выполняли по трем технологическим схемам:

1 схема – с остыванием каждого наплавленного валика до температуры окружающего воздуха;

2 схема – с предварительным подогревом поверхности детали до  $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  перед наплавкой первого износостойкого слоя. Наплавка второго износостойкого слоя осуществлялась с остыванием каждого наплавленного валика до температуры окружающего воздуха;

3 схема – с остыванием каждого наплавленного валика первого износостойкого слоя до температуры окружающего воздуха. Наплавка второго износостойкого слоя осуществлялась с предварительным подогревом поверхности детали до  $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

После наплавки образцы подвергались механической порезке для анализа поперечного сечения наплавленного слоя и шлифовке по плоскости с целью изучения ориентации и раскрытия трещин. Результаты исследований представлены в таблице 2.

Как следует из полученных результатов, температурный режим многослойной электродуговой наплавки износостойких сплавов оказывает заметное влияние на характер развития и ориентацию трещин в наплавленном слое. Наплавка по технологической схеме № 1 приводит к образованию сетки трещин. В местах пересечения трещин наблюдаются локальные выкрашивания наплавленного слоя, что свидетельствует о создании температурных условий, способствующих разрушению карбидной фазы и отколам ее частиц по границам трещин. После шлифовки наплавленной по первой схеме поверхности произошло скалывание краевых участков наплавленного слоя, которое произошло по границам сетки трещин, пересекающих сечение наплавки в вертикальной и горизонтальной плоскости.

При наплавке по технологической схеме № 2 наблюдается иной характер трещинообразования. Как

видно из таблицы 2, на поверхности наплавленного слоя наблюдаются направленные трещины с раскрытием 0,3–0,5 мм и пересекающие их под углом волосовидные трещины. Горизонтальных трещин и отколов в наплавленном слое не обнаружено. Однако такой характер трещинообразования при совпадении направления трещин с направлением основной изнашивающей нагрузки может приводить к повышенному износу по границам трещин и, как следствие, к снижению эксплуатационной стойкости упрочненных деталей [9].

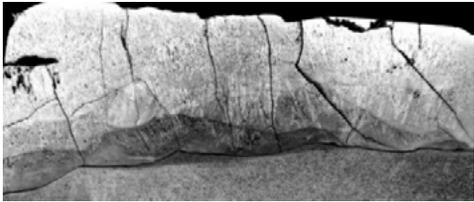
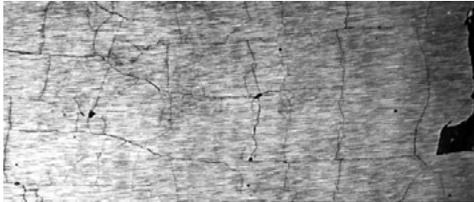
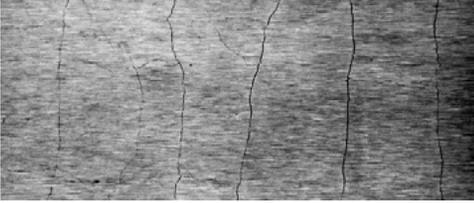
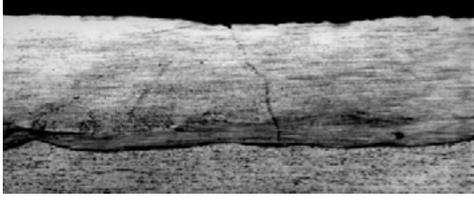
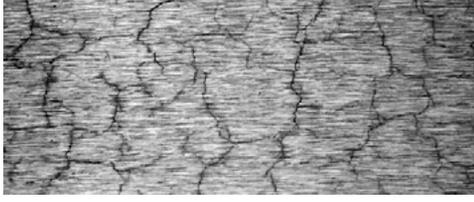
Наиболее оптимальный характер трещинообразования в виде хаотичной сетки трещин получен при наплавке по технологической схеме № 3, так как при ней образуются волосовидные трещины разной направленности, имеющие по толщине наплавленного слоя ломаный характер. Это свидетельствует о том, что применение такой технологической схемы наплавки способствует замедленному остыванию наплавленного слоя и смещению вектора горизонтальных скалывающих напряжений в наиболее опасной зоне перехода остаточных сжимающих напряжений остывающего наплавленного валика в растягивающие напряжения первого износостойкого слоя наплавки. Полученный в результате ломаный характер трещины по толщине износостойкого слоя при наплавке устраняет образование горизонтальных трещин откола, а при эксплуатации будет способствовать повышению ресурса упрочненной поверхности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При восстановлении и упрочнении рабочих органов машин, подверженных при эксплуатации интенсивному ударо-абразивному износу, с приме-

Таблица 2.

Влияние технологии износостойкой наплавки на характер развития и распространения трещин

Технологическая схема	Поперечное сечение упрочненного слоя	Упрочненная поверхность после шлифовки
№ 1		
№ 2		
№ 3		

нением способов электродуговой наплавки высоколегированных износостойких сплавов порошковыми электродными материалами, для повышения их эксплуатационной стойкости следует руководствоваться следующими выводами, полученными в результате выполненной работы:

1. Увеличение тепловой мощности электродугового процесса наплавки износостойких высоколегированных сплавов снижает количество и увеличивает раскрытие трещин за счет интенсивного роста растягивающих напряжений в хрупком наплавленном слое, что может привести к преждевременному износу упрочненной поверхности;

2. Упрочняющую и восстановительную наплавку рабочих элементов деталей машин из марганцовистых и закаливающихся сталей целесообразно выполнять с предварительной наплавкой буферного аустенитного слоя, чтоб предотвратить распространение трещин из наплавленного износостойкого слоя в основной металл детали и их разрушение;

3. Соблюдение разработанного температурного режима электродуговой наплавки износостойкого сплава порошковой проволокой позволяет получить благоприятный характер трещинообразования и снизить вероятность преждевременного износа упрочненной поверхности.

#### Список литературы

1. Пенсин, М. В. Актуальные решения в упрочнении высоконагруженных поверхностей деталей бурового и нефтепромышленного оборудования / М. В. Пенсин, В. Ф. Макаров, Е. С. Макаренков и др. // Сфера Нефть и Газ. 2022. № 2. С. 56-60.
2. Щербаков, А. П. Выбор материала и метода повышения износостойкости элементов строительных машин / А. П. Щербаков // Вестник СибАДИ. 2020. Том 17 № 4. С. 464-475.
3. Серов, Н. В. Технологические аспекты повышения работоспособности плугов / Н. В. Серов, А. В. Серов, П. И. Бурак // Международный технико-экономический журнал. 2015. № 4. С. 81-90.
4. Малышев, В. И. Повышение эффективности автоматической наплавки изношенных деталей сельхозтехники / В. И. Малышев // Сварочное производство. 1983. № 10. С. 18-20.
5. Федоровский, Л. Е. Повышение долговечности деталей сельхозмашин / Л. Е. Федоровский // Технология и организация производства. 1976. № 3. С. 42-43.
6. Сучков, О. К. Износостойкая наплавка деталей / О. К. Сучков. М. «Колос». 1974, 95 с.
7. Сварка и наплавка. Пособие по выбору наплавочных материалов ЭСАБ [Интернет ресурс]: <https://www.studfile.net/preview/4500142/>.
8. BOHLER PRODUCTION [Интернет ресурс]: <https://www.bohler.com/>.
9. Степанов, Б. В. Электродные материалы для сварочных и наплавочных работ / Б. В. Степанов, В. В. Яковлев // Сварочное производство. 1983. № 7. С. 10-12.
10. Рыжков, Ф. Н. Трещиностойкость твердых наплавленных сплавов / Ф. Н. Рыжков, В. Я. Воронников, И. Н. Замулина // Сварочное производство. 1994. № 2. С. 15-16.
11. Chigarev, V.V. Zurnadzhy High-temperature solid particle erosion of Cr-Ni-Fe-Carc clad coatings / V.V. Chigarev, B.V. Efremenko, K. Chimizu // Wear. November 2020. P. 129-133.
12. Юзвенко, Ю. А. Влияние трещин на газо-абразивный износ наплавленного металла / Ю. А. Юзвенко, В. П. Шимановский // Автоматическая сварка. 1971. № 2. С. 61-62.
13. Лившиц, Л. С. Оптимизация состава наплавленного металла и параметров технологии износостойкой наплавки / Л. С. Лившиц, О. Ю. Елагина // Сварочное производство. 1992. № 8. С. 19-20.
14. Ксендзык, Г. В. Структурные изменения наплавленного хромистого чугуна при термоциклировании / Г. В. Ксендзык, Д. П. Новикова, Ю. М. Кусков // Автоматическая сварка. 1978. № 1. С. 27-30.
15. Шимановский, В. П. Влияние содержания углерода и твердости наплавленного металла типа Х25Н3С3 на его сопротивление газо-абразивному износу / В. П. Шимановский, Ю. А. Юзвенко, А. Ф. Терещенко и др. // Автоматическая сварка. 1970. № 3. С. 48-50.