УДК 621.791

Р.Н. Сайфуллин, А.Ф. Фаюршин, Р.Р. Хакимов

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОКРЫТИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ ГАЗОПЛАМЕННОЙ НАПЛАВКОЙ И ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ПРИВАРКОЙ

Ключевые слова: восстановление деталей; газопламенная наплавка; остаточные напряжения; конический индентор.

Введение. Технологии получения покрытий путем наращивания поверхностного слоя с использованием различных способов массопереноса широко используются в производстве. Одними из факторов, влияющих на прочность деталей после наращивания, являются остаточные напряжения. В настоящей работе приведены результаты сравнения остаточных напряжений в поверхностном слое образцов, восстановленных электроконтактной приваркой (ЭКП) металлической ленты и наплавленных газопламенным способом [1–3].

При восстановлении деталей электроконтактной приваркой присадочных материалов появление остаточных напряжений в основном связано со значительной нерав-

номерностью температурных полей и пластических деформаций. При ЭКП ленты ширина области, нагретой до 1200°, составляет не более 4...5 мм, глубина – порядка 1...1,5 мм. За пределами этой области наблюдается резкое снижение температуры, на расстоянии около 1 мм от ее границы температура металла не превышает 200 °С. При столь значительных градиентах температур следует ожидать появления растягивающих остаточных напряжений, достигающих предела текучести материала, играющих существенную роль в снижении надежности восстановленных деталей. Эти вопросы рассмотрены в работах [5–9, 12–14].

Целью исследования являлось сравнение остаточных напряжений в образцах,

наплавленных газопламенным способом и ЭКП стальной ленты, для последующего совершенствования технологии и обеспечения требуемой надежности восстановленных и упрочненных деталей.

Исследовались величины и распределения остаточных напряжений при наплавке газопламенным способом порошковых материалов; величины и распределения остаточных напряжений в поверхностном слое при ЭКП стальной ленты.

Материалы и методы исследования. Общий цикл работ при измерении остаточных напряжений включает два этапа: первый (предварительный этап) – определение

начальных условий для данного материала, второй – измерение остаточных напряжений. На предварительном этапе решают задачу построения диаграммы вдавливания $W_{max}(d)$ для материала детали [1]. При измерении остаточных напряжений (второй этап) эти данные используются как описывающие базовые нормальные перемещения поверхности вокруг отпечатка, на фоне которого наблюдаются изменения, вызванные влиянием поверхностных остаточных напряжений.

Внешний вид образцов, исходные данные по материалам, основа материала и толщина покрытий приведены в таблице 1.

Таблица 1 Материалы образцов и покрытий

№	Материал основы	Материал покрытия	Примечание	Внешний вид
1	Сталь 65Г	ПГ12Н-02, ТУ 48-19-383	Газопламенная наплавка порошка, толщина слоя 2 мм
2	Сталь 65Г	ПГ12Н-02, ТУ 48-19-383	Газопламенная наплавка порошка, толщина слоя 1,5 мм, слой удален полностью
3	Сталь 65Г	ПГ12Н-02, ТУ 48-19-383	Газопламенная наплавка порошка, толщина слоя 1 мм
4	Сталь 45	Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т, ГОСТ 5632-72	ЭКП стальной ленты
5	Сталь 45	Сталь 45, ГОСТ 1050-88	ЭКП стальной ленты 2 прохода
6	Сталь 45	Сталь 45, ГОСТ 1050-88	ЭКП стальной ленты

Были изготовлены образцы, имеющие плоскую форму, длиной $L = 40 \dots 50$ мм, шириной $B = 30 \dots 40$ мм и толщиной $S = 5 \dots 7$ мм. В направлении L по центру поверхности образца наплавлен порошок газопламенным способом или электроконтактным способом приварена лента шириной $b = 10 \dots 15$ мм.

Основные размеры и шаг замеров показаны на рисунке 1.

Рисунок 1
Общий вид и эскиз образца

Измерения остаточных напряжений проводили с шагом $a = 5 \dots 7$ мм вдоль образца, в некоторых случаях при достаточной ширине покрытия производили замеры в два ряда, также отступая шаг a . Результаты остаточных напряжений в покрытиях, полученных газопламенной наплавкой по-

рошковых материалов, приведены в таблице 2. Результаты измерения остаточных напряжений в образцах представлены на рисунках 2–4, средние значения приведены без учета всплесков. Данные представлены по отношению к пределу текучести основного металла.

При газопламенной наплавке на сталь 65Г порошка ПГ12Н-02 средние значения главных остаточных напряжений приваренного слоя толщиной 2 мм составили $\sigma_x^{\text{ост}} = 0,16\sigma_T$, $\sigma_y^{\text{ост}} = 0,17\sigma_T$ в долях предела текучести основного металла или в абсолютных значениях $\sigma_x^{\text{ост}} = 99$ МПа, $\sigma_y^{\text{ост}} = 114$ МПа, толщина слоя в 1 мм даёт средние значения главных остаточных напряжений $\sigma_x^{\text{ост}} = 0,26\sigma_T$, $\sigma_y^{\text{ост}} = 0,27\sigma_T$ в долях предела текучести основного металла или в абсолютных значениях $\sigma_x^{\text{ост}} = 124$ МПа, $\sigma_z^{\text{ост}} = 86$ МПа.

При тех же материалах после полного снятия приваренного слоя средние значения главных остаточных напряжений составили $\sigma_x^{\text{ост}} = 0,26\sigma_T$, $\sigma_y^{\text{ост}} = 0,24\sigma_T$ в долях предела текучести основного металла или в абсолютных значениях $\sigma_x^{\text{ост}} = 184$ МПа, $\sigma_y^{\text{ост}} = 154,5$ МПа.

Результаты остаточных напряжений в деталях, восстановленных ЭКП стальной ленты. Результаты измерения остаточных напряжений в образцах представлены на рисунках 5–7, средние значения приведены без учета всплесков.

Таблица 2 Механические свойства материалов и диаграммы вдавливания для образцов, наплавленных газопламенным способом порошковых материалов

Номер образца	Основной металл			Покрытие		
	предел текучести σ_T , МПа	модуль упругости $E_T \cdot 10^{-4}$, МПа	диаграмма вдавливания $N(d)$	предел текучести σ_T , МПа	модуль упругости $E_T \cdot 10^{-4}$, МПа	диаграмма вдавливания $N(d)$
1	785 ± 20	$0,92 \dots 0,93$	$12,9 \cdot d$	260 ± 15	$0,64 \dots 0,66$	$7,4 \cdot d$
2	785 ± 20	$0,92 \dots 0,93$	$12,9 \cdot d$	260 ± 15	$0,64 \dots 0,66$	$7,4 \cdot d$
3	785 ± 20	$0,92 \dots 0,93$	$12,9 \cdot d$	260 ± 15	$0,64 \dots 0,66$	$7,4 \cdot d$

Примечание: d – диаметр отпечатка индентора, мм.

При ЭКП ленты из нержавеющей стали 12Х18Н10Т на основу из стали 45 средние величины компонент тензора остаточных напряжений в области, удаленной от краев, составляют $\sigma_x^{\text{ост}} = 0,92\sigma_T$, $\sigma_y^{\text{ост}} = 0,95\sigma_T$ в долях предела текучести основного металла или в абсолютных значениях $\sigma_x^{\text{ост}} = 424,2$ МПа, $\sigma_y^{\text{ост}} = 437,3$ МПа. При приварке на сталь 45 ленты из стали 45 в два прохода

средние остаточные напряжения составляют $\sigma_x^{\text{ост}} = 0,25\sigma_T$, $\sigma_y^{\text{ост}} = 0,23\sigma_T$ в долях предела текучести основного металла или в абсолютных значениях $\sigma_x^{\text{ост}} = 104$ МПа, $\sigma_y^{\text{ост}} = 87,7$ МПа. В образце из стали 45 с приваренной лентой из стали 45 за один проход на протяжении покрытия выделяются разгруженные зоны до уровня $0 \dots 0,2$ от предела текучести основного металла.

Средние величины остаточных напряжений без учета разгруженной зоны составляют $\sigma_x^{\text{ост}} = 0,33\sigma_T$, $\sigma_y^{\text{ост}} = 0,35\sigma_T$ в долях предела текучести основного металла или в абсолютных значениях $\sigma_x^{\text{ост}} = 239...243$ МПа,

$\sigma_y^{\text{ост}} = 239...243$ МПа. С учетом разгруженной зоны $\sigma_x^{\text{ост}} = 0,28\sigma_T$, $\sigma_y^{\text{ост}} = 0,26\sigma_T$ в долях предела текучести основного металла или в абсолютных значениях $\sigma_x^{\text{ост}} = 168$ МПа, $\sigma_y^{\text{ост}} = 181$ МПа.

Рисунок 2

Диаграмма измерения поверхностных остаточных напряжений в образце № 1

Рисунок 3

Диаграмма измерения поверхностных остаточных напряжений в образце № 2

Рисунок 4

Диаграмма измерения поверхностных остаточных напряжений в образце № 3

Результаты исследования показали, что величина и распределение поверхностных

остаточных напряжений при восстановлении деталей присадочных материалов из числа

рассмотренных факторов зависят от вида и марки основного и присадочного материалов, а также особенностей технологии. Можно сказать о высокой нагруженности поверхностного слоя при восстановлении деталей ЭКП стальной ленты: поверхностные оста-

точные напряжения при этом способе достигают предела текучести основного металла. При газопламенной наплавке порошковых материалов остаточные напряжения также растягивающие, их величины значительно ниже предела текучести основного металла.

Таблица 3 Механические свойства материалов и диаграммы вдавливания для образцов, восстановленных ЭКП стальной ленты

Номер образца	Основной металл			Покрытие		
	предел текучести σ_T , МПа	модуль упругости $E_T \cdot 10^{-4}$, МПа	диаграмма вдавливания $N(d)$	предел текучести σ_T , МПа	модуль упругости $E_T \cdot 10^{-4}$, МПа	диаграмма вдавливания $N(d)$
4	300 ± 10	$0,64 \dots 0,66$	$8,6 \cdot d$	420 ± 20	$0,98 \dots 1,0$	$6,4 \cdot d$
5	300 ± 10	$0,64 \dots 0,66$	$8,6 \cdot d$	890 ± 40	$0,79 \dots 0,9$	$17,0 \cdot d$
6	300 ± 10	$0,64 \dots 0,66$	$8,6 \cdot d$	890 ± 40	$0,79 \dots 0,9$	$17,0 \cdot d$

Примечание: d – диаметр отпечатка индентора, мм.

Рисунок 5

Диаграмма измерения поверхностных остаточных напряжений в образце № 4

Рисунок 6

Диаграмма измерения поверхностных остаточных напряжений в образце № 5

В процессе ЭКП стальной ленты в поверхностном слое возникает неравномерное в направлении нормали к поверхности температурное поле. Наивысшая температура при контактной сварке наблюдается в зоне наибольшего электросопротивления, т. е. в

области контакта основного металла и привариваемого покрытия. В силу малости толщины привариваемого покрытия можно принять, что в нем по толщине температура постоянная и равна максимальному значению, а в направлении толщины детали в

целом является функцией радиуса. Вследствие наличия градиентов температуры в процессе приварки покрытия как в поверхностном слое, так и в объеме детали следует ожидать появления объемного остаточного напряженного состояния. Однако с учетом особенностей процесса, состоящих в том, что приварка производится на высо-

кой скорости с относительно небольшим общим тепловложением при высокой скорости охлаждения (использование сопутствующего принудительного охлаждения), в области локализации температурного поля напряженное состояние плоское, описываемое двумя компонентами тензора напряжений – $\sigma_x^{\text{ост}}$ и $\sigma_y^{\text{ост}}$.

Рисунок 7

Диаграмма измерения поверхностных остаточных напряжений в образце № 6

Качественные представления о процессе формирования остаточных напряжений при ЭКП покрытия в виде комбинации рассмотренных механизмов вполне обосновывают полученные экспериментальные результаты: в поверхностном слое (в покрытии) на удалении от мест начала и окончания сварки после полного остывания остаточные напряжения одного знака, растягивающие, по величине близки к пределу текучести основного металла.

При газопламенной наплавке порошковых материалов концентрация тепловложения существенно ниже, чем при ЭКП стальной ленты. По толщине привариваемого слоя распределение температуры более равномерное, поскольку тепло расходуется на спекание частиц порошка между собой и с поверхностью основы [4, 10, 11]. Поэтому при наплавке порошковых материалов уровень остаточных напряжений несколько ниже по сравнению с приваркой ленты. Кроме того, при приварке порошковых материалов нет начального напряженно-де-

формированного состояния покрытия в месте сварки вследствие отсутствия связей между частицами порошка. Материал основы при этом в силу его массивности по сравнению с размерами наносимого покрытия и значительного теплоотвода не оказывает существенного влияния на формирующиеся остаточные напряжения.

Выводы. При газопламенной наплавке порошковых материалов остаточные напряжения на 50...70 % ниже по сравнению с ЭКП стальной ленты. Так как остаточные напряжения покрытия при газопламенной наплавке по значению ниже, чем при ЭКП, наплавленная поверхность не будет деформирована. При восстановлении деталей ЭКП стальной ленты поверхностный слой характеризуется высокой нагруженностью, компоненты поверхностных остаточных напряжений растягивающие, близки к пределу текучести материала, а в наплавочных технологиях для обеспечения надежности деталей необходимо снижение остаточных напряжений.

Библиографический список

1. Фаюршин, А.Ф. Исследование остаточных напряжений в упрочненных и вос-

становленных деталях [Текст] / А.Ф. Фаюршин, Р.Р. Хакимов, И.И. Багаутдинова,

А.А. Третьяков // Ремонт, восстановление, модернизация. 2016. № 1. 39 с.

2. Хакимов, Р.Р. Основные направления повышения надежности и долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин [Текст] / Р.Р. Хакимов, И.И. Багаутдинова // XI промышленный салон. Технологии реновации машин и оборудования: материалы Всероссийской научно-практической конференции, 25–26 февраля 2016 г. Уфа: Башкирский ГАУ, 2016. С. 303–308.

3. Фаюршин, А.Ф. Результаты лабораторных измерений остаточных напряжений на образцах, упрочненных газопламенным способом [Текст] / А.Ф. Фаюршин, Р.Р. Хакимов, И.И. Багаутдинова // Евразийский союз ученых (ЕСУ). 2015. № 10-2(19). С. 156–159.

4. Фаюршин, А.Ф. Результаты полевых испытаний рабочих органов почвообрабатывающих машин упрочненных порошковыми композициями [Текст] / А.Ф. Фаюршин, Р.Р. Хакимов, И.И. Салимьянова, А.А. Тункин, Р.Ф. Валиев // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 118. С. 214–271.

5. Сайфуллин, Р.Н. Исследование порошково-полимерных лент для восстановления изношенных деталей [Текст] / Р.Н. Сайфуллин // Технология металлов. Наука и технологии. 2000. № 3. С. 11–13.

6. Сайфуллин, Р.Н. Особенности формирования структуры металлопокрытий, нанесенных электроконтактной наплавкой проволокой из углеродистых и легированных сталей [Текст] / Р.Н. Сайфуллин, М.З. Нафиков, И.И. Загиров, Э.Л. Левин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 9. С. 31–37.

7. Юферов, К.В. Особенности электроконтактной приварки термообработанной стальной ленты [Текст] / К.В. Юферов, Р.Н. Сайфуллин, М.Н. Фархшатов, Э.Л. Левин // Ремонт, восстановление, модернизация. 2012. № 1. С. 23–25.

8. Сайфуллин, Р.Н. Повышение эффективности технологии восстановления деталей электроконтактной приваркой порош-

ковых материалов [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук / Р.Н. Сайфуллин. Уфа, 2010. 425 с.

9. Сайфуллин, Р.Н. Восстановление изношенных деталей машин электроконтактной приваркой [Текст] / Р.Н. Сайфуллин, Э.Л. Левин, М.Н. Фархшатов, И.Р. Гаскаров, Н.М. Юнусбаев, В.С. Наталенко // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2008. № 11. С. 28–31.

10. Хакимов, Р.Р. Условия работы почвообрабатывающих машин и пути повышения их долговечности [Текст] / Р.Р. Хакимов, А.Ф. Фаюршин // Аграрная наука в инновационном развитии АПК: материалы Международной научно-практической конференции в рамках XXV Международной специализированной выставки «Агрокомплекс-2015», 17–19 марта 2015 г. Уфа Башкирский ГАУ, 2015. Ч. 2: Инновационное развитие животноводства и ветеринарной медицины. С. 322–328.

11. Фаюршин, А.Ф. Повышение долговечности лап культиваторов в сельскохозяйственных ремонтных предприятиях [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А.Ф. Фаюршин. Уфа, 2006. 134 с.

12. Фархшатов, М.Н. Повышение ресурса автотракторных деталей при их восстановлении [Текст] / М.Н. Фархшатов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2006. № 7. С. 31–33.

13. Фархшатов, М.Н. Пути повышения усталостной прочности восстановленных деталей электроконтактной приваркой стальной высокоуглеродистой ленты [Текст] / М.Н. Фархшатов, К.В. Юферов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2012. № 3. С. 27–29.

14. Фархшатов, М.Н. Определение остаточных напряжений покрытий, нанесенных электроконтактной приваркой ленты из коррозионно-стойких деталей [Текст] / М.Н. Фархшатов // Вестник Оренбургского государственного университета. 2006. № 9. С. 349–352.

Сведения об авторах

1. **Сайфуллин Ринат Назирович**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии металлов и ремонт машин ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34. Тел.: (347) 241-64-13.

2. **Фаюшин Азамат Фаритович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии металлов и ремонт машин ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34. Тел.: 89273035192, e-mail: azamatff@yandex.ru.

3. **Хакимов Ринат Рафисович**, аспирант кафедры технологии металлов и ремонт машин ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34. Тел.: 89373494399, e-mail: hakim_rinat@mail.ru.

В статье представлены результаты сравнения поверхностных остаточных напряжений в восстановленных деталях, определенных с использованием упругопластического контактного взаимодействия. Иссле-

дования проведены на различных покрытиях из компактных и порошковых материалов с использованием оптико-электронной установки.

R. Saifullin, A. Fayurshin, R. Khakimov

RESIDUAL STRESSES AT GAS-FLAME SURFACING AND ELECTROCONTACT WELDING

Key words: restoration of parts; gas-flame welding; residual stresses; conical indenter.

Authors' personal details

1. **Saifullin Rinat**, Doctor of technical sciences, professor of the Metal Technology and Machine Repair chair. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University». Ufa, 50-letiya Otyabrya St., 34. Phone: (347) 241-64-13.

2. **Fayurshin Azamat**, Candidate of technical sciences, assistant professor of the Metal Technology and Machine Repair chair. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University». Ufa, 50-letiya Otyabrya St., 34. Phone: 89273035192, e-mail: azamatff@yandex.ru.

3. **Khakimov Rinat**, Post-graduate student of the Metal Technology and Machine Repair chair. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University». Ufa, 50-letiya Otyabrya St., 34. Phone: 89373494399, e-mail: hakim_rinat@mail.ru.

The article presents the comparison results of the surface residual stresses in the restored parts determined with the help of elastoplastic

contact interaction. Studies are conducted on different surfaces of compact and powder materials using an electro-optical installation.

© Сайфуллин Р.Н., Фаюшин А.Ф., Хакимов Р.Р.