

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

А.Г. Игнатьев¹, А.А. Третьяков²

¹Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

²ООО «ДСТ-Урал», г. Челябинск, Россия

Восстановление деталей обеспечивает повторное и неоднократное использование до 70 % изношенных деталей. Восстановление деталей является экономически целесообразным, себестоимость восстановления обычно не превышает 30 % стоимости новых деталей. Однако использование большинства методов и технологий восстановления деталей приводит к снижению их долговечности в сравнении с новыми. Для высоконагруженных валов фактором, определяющим их долговечность, является сопротивление усталости. Первостепенным фактором, влияющим на усталостную прочность детали, является состояние поверхностного слоя. Доминирующее значение в повышении сопротивления усталости восстановленных деталей принадлежит физико-механическим свойствам поверхностного слоя, упрочнению и остаточным напряжениям.

В статье рассмотрена технология восстановления деталей с использованием электроконтактной приварки металлической ленты. Получены данные о поверхностных остаточных напряжениях, возникающих в результате приварки покрытия. Результаты измерений показали высокую нагруженность поверхностного слоя. Рассмотрены варианты снижения остаточных напряжений в восстановленных деталях применением поверхностного пластического деформирования и электроконтактного упрочнения. Для повышения долговечности деталей, восстановленных электроконтактной приваркой металлической ленты, рекомендовано применение электроконтактного упрочнения. Применение этого способа позволяет повысить предел выносливости восстановленных деталей в 1,5...2,5 раза.

Ключевые слова: восстановление деталей, долговечность, предел выносливости, остаточные напряжения, поверхностное пластическое деформирование, электроконтактное упрочнение.

Введение

Основными причинами отказов машин являются износ (до 60 % отказов) и механические повреждения деталей (около 20 %). Большая часть (до 70 %) изнашивающихся деталей – это детали с сечением цилиндрической формы (валы, оси), работающие в условиях сопряжения. До 80 % изношенных деталей выбраковывается при износе до 0,6 мм, причем большинство из них – при износе до 0,3 мм [1, 2].

Долговечность высоконагруженных валов и осей по большей части определяется их сопротивлением усталости, так как они эксплуатируются в условиях динамических, повторных и знакопеременных нагрузок [3, 4]. Эксплуатационные свойства деталей – сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная стойкость и др. – зависят от качества поверхностного слоя. Поверхностным слоем называют слой металла, имеющий структуру, фазовый и химический состав, отличающиеся от основной массы детали. Поверхностный слой характеризуется макро- и микрогеометрическими параметрами и физико-механическими свойствами. К геометрическим параметрам относят шероховатость, волнистость, отклонения от заданной геометрической формы. Набор физико-химических параметров включает структуру, фазовый состав, химический состав, механические свойства, деформацию (наклеп), остаточные напряжения.

При восстановлении изношенных деталей машин наиболее распространенным способом является нанесение металлических покрытий. Тот или иной вариант восстановления применяется

в зависимости от набора показателей – толщины наращенного слоя, прочности сцепления покрытия с основным металлом, механических свойств покрытия, глубины термического влияния, припуска на механическую обработку, производительности восстановления, удельных энергетических затрат и др. Наиболее распространенными являются различные варианты наплавки и электроконтактной приварки присадочного материала [5, 6]. Для повышения долговечности валов применяют технологические методы упрочнения поверхностного слоя. Их подразделяют на несколько групп: химико-термическая обработка, объемная и поверхностная закалка, электрохимическая и механотермическая обработка, наплавка износостойких слоев, напыление порошковых покрытий, ионно-плазменная обработка, плакирование, механическое упрочнение и др. [3, 7, 8].

В условиях эксплуатации валов возникающие при их восстановлении и упрочнении технологические остаточные напряжения могут оказывать как отрицательное, так и положительное влияние на их долговечность. Имея в виду, что каждое функциональное свойство детали описывается набором параметров, в подавляющем большинстве случаев растягивающие остаточные напряжения вызывают снижение этих параметров, т. е. их влияние отрицательно, а сжимающие напряжения зачастую повышают значения этих параметров, т. е. их влияние оказывается положительным [9–14]. При циклическом нагружении степень влияния остаточных напряжений зависит от коэффициента симметрии цикла, концентрации напряжений и уровня рабочих напряжений [15–19]. В целом сжимающие остаточные напряжения способствуют повышению предела выносливости, а растягивающие – его снижению. Наибольшее отрицательное влияние растягивающих остаточных напряжений наблюдается в условиях многоциклового усталости при симметричном цикле: они вызывают снижение предела выносливости на 35...50 % по сравнению с ненапряженным эталоном [20–23]. Данные многочисленных экспериментальных исследований показывают, что долговечность восстановленных валов и осей в целом составляет 0,3...0,7 от долговечности новых деталей. При этом известно, что до 40 % снижения долговечности связано с влиянием возникающих остаточных напряжений [24].

Повышение усталостной прочности металла возможно путем наведения в поверхностном слое детали сжимающих остаточных напряжений. В связи с этим для обеспечения требуемых функциональных свойств восстанавливаемых деталей при отладке технологического процесса необходимо получение достоверной информации об остаточных напряжениях и использование этой информации при выборе рациональных режимов восстановления, обеспечивающих создание в поверхностном слое благоприятного напряженного состояния. Известно, что только за счет создания в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений при прочих равных условиях долговечность восстановленной детали можно повысить практически до уровня новой, а в комплексе с другими технологическими решениями вполне реально получение детали с повышенными в сравнении с эталоном характеристиками [21, 25].

В настоящей работе приводятся результаты исследований, нацеленных на разработку эффективной технологии восстановления высоконагруженных валов с использованием электроконтактной приварки присадочных материалов. Исследования проведены в рамках сотрудничества с Башкирским государственным аграрным университетом по вопросам научно-исследовательской деятельности.

Объект исследования

Остаточные напряжения измеряли в образцах с покрытиями, выполненными по технологии электроконтактной приварки металлической ленты [24]. Измерения выполняли на образцах цилиндрической формы, изготовленных из стали 45, по образующей поверхности которых приварено покрытие (рис. 1); материал покрытия – лента, сталь 45.

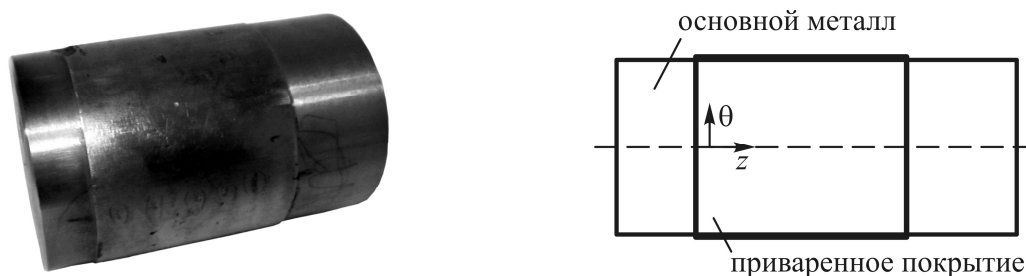


Рис. 1. Образец с покрытием для измерения поверхностных остаточных напряжений

Контроль и испытания

Технология и параметры режимов приварки покрытия приведены в работах [24, 26]. Отдельно измеряли остаточные напряжения в аналогичных образцах, дополнительно подвергнутых поверхностному пластическому деформированию обкаткой и электроконтактному упрочнению по разработанной в Башкирском ГАУ технологии [27].

Методы исследования

Метод измерения остаточных напряжений

Остаточные напряжения в поверхностном слое образцов с нанесенным покрытием определяли методом, основанным на упругопластическом контактом взаимодействии инструмента с поверхностью образца [28, 29]. В качестве инструментов для нагружения применяли шаровой индентор диаметром 10 мм и конический индентор с углом раскрытия 120° . Принцип метода заключается в использовании закономерностей взаимосвязи между деформированным состоянием поверхности в условиях локального (точечного) упругопластического контактного нагружения и остаточными напряжениями в поверхностном слое детали. Измерение возникающих в результате воздействия перемещений выполняли с помощью оптической системы метода электронной спекл-интерферометрии (ЭСИ) с регистрацией нормальной компоненты вектора перемещения.

Величины главных поверхностных остаточных напряжений в точке вдавливания инструмента определяли по выражениям:

– при вдавливании шарового индентора

$$\sigma_{x,y}^{\text{ост}} = \frac{3}{2} \sigma_T \ln \left(1 - \frac{\Delta W^{(y,x)}}{2W_{\text{max}}} \right),$$

– при вдавливании конического индентора

$$\sigma_{x,y}^{\text{ост}} = \frac{5}{7} \sigma_T \ln \left(1 - \frac{\Delta W^{(y,x)}}{W_{\text{max}}} \right),$$

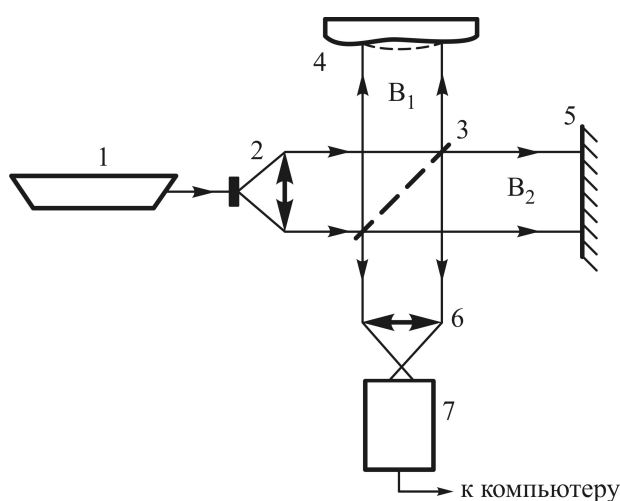
где σ_T – предел текучести материала поверхностного слоя, W_{max} – величина нормального перемещения в контрольной точке распределения перемещений для материала поверхностного слоя детали без остаточных напряжений (определяется по предварительно полученной диаграмме вдавливания $W_{\text{max}}(d)$ для материала покрытия, d – диаметр отпечатка), $\Delta W^{(y,x)}$ – изменение величины максимального нормального перемещения на оси, перпендикулярной действующему напряжению, по отношению к W_{max} ,

$$\Delta W^{(x,y)} = W_{\sigma}^{(x,y)} - W_{\text{max}},$$

где W_{σ} – перемещение в контрольной точке для детали с остаточными напряжениями.

Электронная спекл-интерферометрия

Для измерения нормальных перемещений поверхности детали, возникающих в результате воздействия инструмента, использовали оптическую систему метода ЭСИ (рис. 2).



При деформировании поверхности величина перемещения W определяется по формуле

$$W = n \frac{\lambda}{2},$$

где λ – длина волны излучения, n – порядковый номер интерференционной полосы, проходящей через данную точку поверхности.

Рис. 2. Оптическая схема интерферометра для регистрации нормальных перемещений поверхности: B_1 , B_2 – ветви интерферометра, 1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – делитель (полупрозрачное зеркало), 4 – объект, 5 – зеркало, 6 – объектив, 7 – цифровой фотодетектор (регистрирующая среда)

Методика измерения остаточных напряжений

Общий комплекс работ при измерении остаточных напряжений включал два этапа: первый (предварительный этап) – настройка метода измерения на материал детали, второй – измерение

остаточных напряжений. На первом этапе решали задачу построения диаграммы вдавливания $W_{\max}(d)$ для материалов основы и поверхностного слоя детали в виде

$$W_{\max}(d) = W_{0d} \cdot \left(\frac{d}{d_0} \right),$$

где W_{0d} – параметр, имеющий смысл условного максимального перемещения при диаметре отпечатка $d_0 = 1$ мм.

При измерении остаточных напряжений (на втором этапе) эти данные использовали как начальные условия для перемещений поверхности вокруг отпечатка, на фоне которых происходят изменения, вызванные влиянием поверхностных остаточных напряжений.

Методика измерений включала последовательность действий:

- 1) с помощью электронно-оптической установки записывали распределение нормальных перемещений поверхности в наплыве вокруг отпечатка;
- 2) измеряли диаметр отпечатка;
- 3) с использованием диаграммы вдавливания рассчитывали величину нормального перемещения W_{\max} для измеренного диаметра отпечатка;
- 4) по распределению перемещений определяли перемещения $W_{\sigma}^{(x)}$ и $W_{\sigma}^{(y)}$ на осях симметрии распределения перемещений в контрольных точках;
- 5) вычисляли изменения перемещений $\Delta W^{(x)}$ и $\Delta W^{(y)}$ в этих контрольных точках;
- 6) рассчитывали величины главных остаточных напряжений $\sigma_x^{\text{ост}}$ и $\sigma_y^{\text{ост}}$.

При использовании шарового индентора создавали отпечаток диаметром 0,7...1,2 мм, при использовании конического индентора – 0,4...0,8 мм.

Испытания на многоцикловую усталость

Испытания на многоцикловую усталость проводили на образцах в соответствии с ГОСТ 25.502-79. Использовали образцы следующих типов: эталонный (сталь 45 нормализованная), закаленный (сталь 45 закаленная, твердость поверхности HRC 48...50), наваренные (основной металл – сталь 45, металл покрытия – лента, сталь 45), упрочненные (наваренные образцы с дополнительным электроконтактным упрочнением поверхности).

Испытания проводили при симметричном изгибе консольных образцов с коэффициентом асимметрии цикла $R = -1$ на базе 10^7 циклов [30, 31]. В каждой серии испытывали не менее 6 образцов. По результатам испытаний строили кривые усталостной прочности (кривые Велера), показывающие взаимосвязь напряжения σ с количеством N циклов, выдержанных образцом до конца испытания.

Результаты исследований и обсуждение

Результаты измерения остаточных напряжений в образцах с приваренным покрытием показаны на рис. 3. Данные приведены по отношению к пределу текучести основного металла. Экспериментальные данные на рисунке показаны точками, а сплошная линия представляет собой линию тренда, построенную методом наименьших квадратов с использованием полинома при установленной погрешности 10 %.

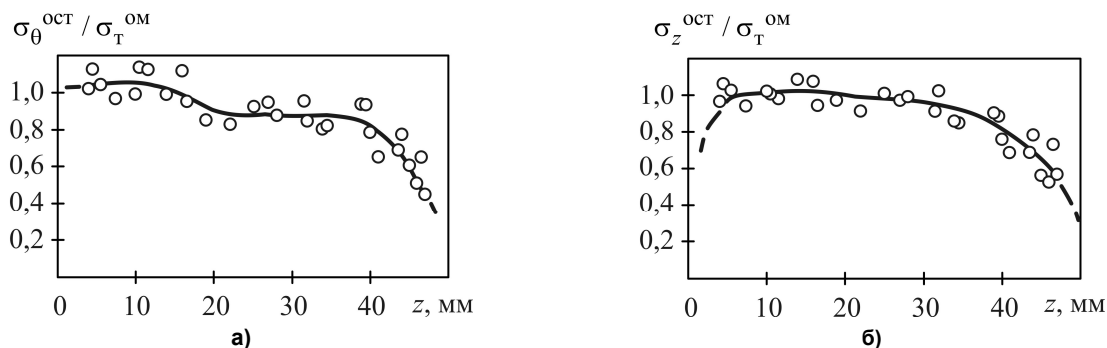


Рис. 3. Распределения окружных (а) и осевых (б) остаточных напряжений в поверхностном слое образца с приваренным покрытием

Измерения в целом показали на высокий уровень нагруженности поверхностного слоя. Окружные и осевые остаточные напряжения σ_{θ} и σ_z в поверхностном слое (в покрытии) одного знака, растягивающие. Средние величины компонент тензора остаточных напряжений в области,

Контроль и испытания

удаленной от краев, составляют $\sigma_{\theta}^{\text{ост}} = 0,95\sigma_T$, $\sigma_z^{\text{ост}} = 0,96\sigma_T$ в долях предела текучести основного металла или в абсолютных значениях $\sigma_{\theta}^{\text{ост}} = 274...293$ МПа, $\sigma_z^{\text{ост}} = 280...299$ МПа. Интенсивность остаточных напряжений в поверхностном слое $\sigma_i^{\text{ост}} = 277...296$ МПа, т. е. 0,95 предела текучести основного металла.

Результаты измерения остаточных напряжений в образцах с приваренным покрытием, дополнительно подвергнутых поверхностному пластическому деформированию (ППД) обкаткой шариком в соответствии со схемой (рис. 4), показаны на рис. 5. Данные приведены по отношению к пределу текучести основного металла.

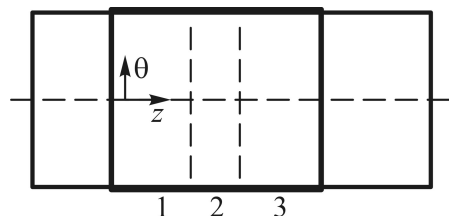


Рис. 4. Схема обработки поверхности покрытия ППД: 1 – зона обработки с усилием обкатки P_{max} ; 2 – зона без обработки; 3 – зона обработки с усилием обкатки $0,5P_{\text{max}}$

В зонах, где проведена обработка поверхности ППД, выявлены сжимающие остаточные напряжения $\sigma_{\theta}^{\text{ост}}$ и $\sigma_z^{\text{ост}}$. В зоне 2, где обработка не применялась, окружные и осевые остаточные напряжения растягивающие, но вследствие общего перераспределения максимальный их уровень не превышает 0,5 от предела текучести основного металла. В зоне 1 в удаленной от ее краев области средние величины сжимающих остаточных напряжений находятся на уровне $0,35\sigma_T$, а в зоне 3 – $0,13\sigma_T$ в долях предела текучести основного металла или в абсолютных значениях соответственно 105...112 МПа и 39...42 МПа.

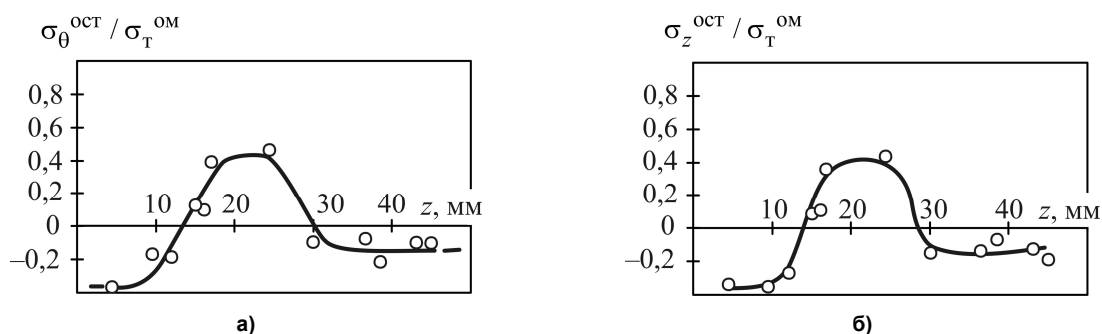


Рис. 5. Распределение окружных (а) и осевых (б) остаточных напряжений в поверхностном слое образца, обработанного ППД

Результаты исследования подтвердили, что ППД обкаткой роликом или шариком является эффективным способом управления остаточными напряжениями в деталях, восстановленных электроконтактной приваркой металлической ленты. Следует констатировать качественное и количественное совпадение полученных результатов с данными других авторов [32]. Однако ППД характерно значительное деформационное воздействие на поверхностный слой, что может привести к повреждению восстановленной детали в процессе обработки вследствие существенно пониженных пластических свойств металла в области сцепления покрытия с основой. Наличие такого рода повреждений в виде отслоения покрытия от основы выявлено в процессе испытаний и на некоторых образцах достигало 80...85 % площади покрытия. Таким образом, применение ППД возможно при условии выбора режимов, исключающих повреждение восстановленной детали.

Результаты измерения остаточных напряжений в образцах с покрытием, дополнительно подвергнутых электроконтактному упрочнению, показаны на рис. 6. Данные приведены по отношению к пределу текучести основного металла.

Применение электроконтактного упрочнения приводит к появлению на поверхности покрытия сжимающих остаточных напряжений $\sigma_{\theta}^{\text{ост}}$, достигающих по величине 0,2 предела текучести основного металла. В области сцепления покрытия с основой остаточные напряжения $\sigma_{\theta}^{\text{ост}}$ растягивающие, но незначительные по величине, не превышают $0,2\sigma_T$. Следовательно, электроконтактное упрочнение деталей, восстановленных приваркой ленты, приводит к значительному снижению нагруженности поверхностного слоя. Это можно считать одним из существенных факторов, способствующих повышению долговечности восстановленных деталей.

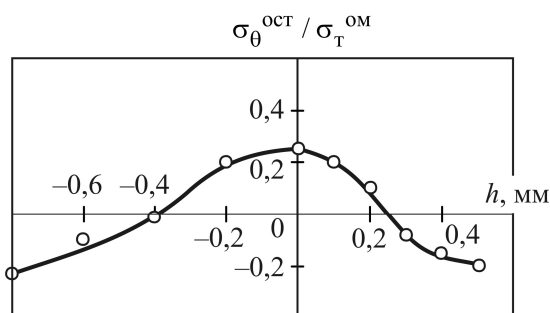


Рис. 6. Распределение окружных остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя образца после электроконтактного упрочнения

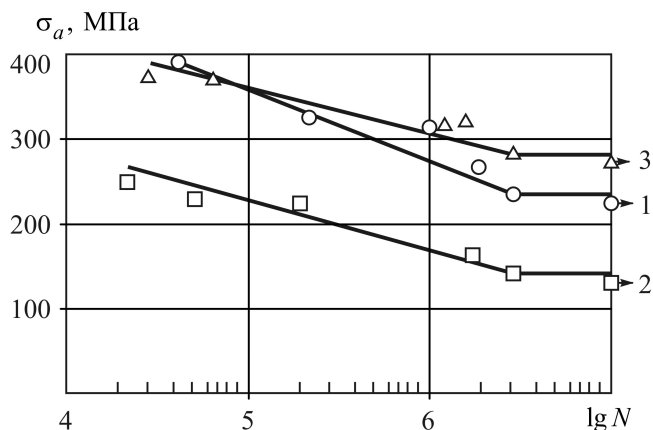


Рис. 7. Результаты усталостных испытаний образцов [27]: 1 – образцы из нормализованной стали 45; 2 – образцы с приваренным покрытием (лента, сталь 45); 3 – образцы с приваренным покрытием (лента, сталь 45) и электроконтактным упрочнением

Результаты сравнительных усталостных испытаний образцов приведены на рис. 7.

Предел выносливости образцов с приваренным покрытием составил 55...65 % от предела выносливости эталонных образцов. В результате применения электроконтактного упрочнения предел выносливости образцов увеличился до 120...125 % от предела выносливости эталонных образцов. В целом применение электроконтактного упрочнения позволило практически в 2 раза повысить предел выносливости деталей, восстановленных электроконтактной приваркой металлической ленты.

Заключение

При восстановлении деталей электроконтактной приваркой металлической ленты поверхностный слой характеризуется высокой нагруженностью, компоненты поверхностных остаточных напряжений растягивающие, близки к пределу текучести материала детали. В технологии восстановления для обеспечения долговечности деталей необходимо снижение остаточных напряжений.

Эффективным способом регулирования остаточных напряжений при восстановлении деталей электроконтактной приваркой ленты является ППД. Применение ППД на рациональных режимах приводит к появлению сжимающих поверхностных остаточных напряжений и повышению усталостной прочности, а соответственно, и долговечности восстановленных деталей в 3...3,5 раза. Однако применение ППД с большой вероятностью может привести к повреждению восстановленных деталей в виде отслоения покрытия от основного металла. В связи с этим необходимо проведение дополнительных исследований с целью подбора рациональных режимов обработки, исключающих возможность повреждения восстановленных деталей.

Для повышения долговечности восстановленных деталей рекомендуется применение электроконтактного упрочнения. Несмотря на несколько меньшую по сравнению с ППД эффективность в контексте управления остаточными напряжениями, данный способ обработки характеризуется существенно меньшей степенью воздействия на восстановленную деталь. При этом применение электроконтактного упрочнения позволяет повысить предел выносливости восстановленных деталей в 1,5...2,5 раза.

Результаты исследований положены в основу усовершенствованной технологии восстановления коленчатых валов моечной машины ОМ22613 [27]. Приведенные в этой работе данные ресурсных испытаний показали почти двукратное повышение долговечности валов, восстановленных по новой технологии.

Литература

1. Восстановление деталей машин / Ф.И. Пантелеев, В.П. Лялякин, В.П. Иванов, В.М. Константинов; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
2. Иванов, В.П. Технология и оборудование восстановления деталей машин / В.П. Иванов. – М.: Техноперспектива, 2007. – 458 с.

3. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справ. / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
4. Проников, А.С. Надежность машин / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
5. Kolasa, A. Regeneration of worn out machine parts surfaces by automatic welding / A. Kolasa, T. Sarnowski, P. Cegielski // *Przegląd spawalnictwa*. – 2015. – Vol. 87, no. 1. – P. 50–57.
6. Voynash, S.A. Rational Route Choosing Methodology for Machine Parts Restoration and Repair / S.A. Voynash, P.A. Gaydukova, A.N. Markov // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 206. – P. 1747–1752. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.708
7. Korotkov, V.A. Properties and commercial application of manual plasma hardening / V.A. Korotkov // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2016. – Vol. 58, no. 7–8. – P. 449–454. DOI: 10.1007/s11041-016-0033-5
8. Сайфуллин, Р.Н. Восстановление и упрочнение автотракторных деталей электроконтактной приваркой металлических материалов / Р.Н. Сайфуллин, Н.М. Юнусбаев, Р.Ш. Набиуллин // *Вестник БГАУ*. – 2016. – № 3. – С. 89–93.
9. Roberts, J.L. Residual stress effects on fatigue life via the stress intensity parameter: PhD diss. – University of Tennessee, 2002. – http://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/2196.
10. Nguyen, T.N. The effect of weld geometry and residual stresses on the fatigue of welded joints under combined loading / T.N. Nguyen, M.A. Wahab // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1998. – Vol. 300 (3). – P. 201–208. DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00418-4
11. Fatigue strength of welded joints in high strength steel Effects of stress concentration factor and welding residual stress / O. Watanabe, S. Matsumoto, Y. Nakano, Y. Saito // *Welding International*. – 1996. – Vol. 10 (3). – P. 201–206. DOI: 10.1080/09507119609548979
12. Effect of near-surface residual stress and microstructure modification from machining on the fatigue endurance of a tool steel / F. Ghanem, C. Braham, M.E. Fitzpatrick, H. Sidhom // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2002. – Vol. 11 (6). – P. 631–639. DOI: 10.1361/105994902770343629
13. Krebs, J. Influence of welding residual stresses on fatigue design of welded joints and components / J. Krebs, M. Kassner // *Welding in the World*. – 2007. – Vol. 51, no. 7/8. – P. 54–68. DOI: 10.1007/BF03266586
14. Fricke, W. Effects of residual stresses on the fatigue behavior of welded steel structures / W. Fricke // *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. – 2005. – Vol. 36 (11). – P. 642–649. DOI: 10.1002/mawe.200500933
15. Fatigue life of a dissimilar welded joint considering the weld residual stress: Experimental and finite element simulation / Weiya Zhanga, Wenchun Jianga, Xu Zhaob, Shan-Tuang Tu // *International Journal of Fatigue*. – 2018. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.01.002
16. Sonsino, C.M. Effect of residual stresses on the fatigue behavior of welded joints depending on loading conditions and weld geometry / C.M. Sonsino // *International Journal of Fatigue*. – 2009. – Vol. 31 (1). – P. 88–101. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2008.02.015
17. Savaria, V. Predicting the effects of material properties gradient and residual stresses on the bending fatigue strength of induction hardened aeronautical gears / V. Savaria, F. Bridier, P. Bocher // *International Journal of Fatigue*. – 2015. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.12.004
18. Barsoum, Z. Residual stress effects on fatigue life of welded structures using LEFM / Z. Barsoum, I. Barsoum // *Engineering Failure Analysis*. – 2009. – Vol. 16 (1). – P. 449–467. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.06.017
19. Liljedahl, C.D.M. Weld residual stress effects on fatigue crack growth behaviour of aluminium alloy 2024-T351 / C.D.M. Liljedahl, J. Brouard, O. Zanellato // *International Journal of Fatigue*. – 2009. – Vol. 31 (6). – P. 1081–1088. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2008.05.008
20. Винокуров, В.А. Теория сварочных деформаций и напряжений / В.А. Винокуров, А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
21. Вишняков, Я.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах / Я.Д. Вишняков, В.Д. Пискарев. – М.: Металлургия, 1989. – 254 с.
22. Bellow, D.G. Residual stresses and fatigue of surface treated welded specimens / D.G. Bellow, N. Wahab, M.G. Faulkner // *Advances In Surface Treatment*. – 1986. – Vol. 2. – P. 85–94.
23. Residual stress effects in fatigue of welded joints / Sarkaki Shahram, Lutes Loren D. // *Journal*

of *Structural Engineering*. – 1988. – Vol. 11, iss. 2. – P. 462–474. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:2(462)

24. Сайфуллин, Р.Н. Свойства покрытий, полученных электроконтактной приваркой присадочных материалов из стальных лент / Р.Н. Сайфуллин, М.Н. Фархиаатов и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 3 (111). – С. 13–16.

25. Игнатъев, А.Г. Учет остаточных напряжений при совершенствовании технологий восстановления деталей / А.Г. Игнатъев, В.А. Коротков, Г.С. Игнатъев // Тракторы и сельхозмашины. – 2009. – № 8. – С. 47–49.

26. Сайфуллин, Р.Н. Опыт восстановления изношенных деталей электроконтактной приваркой стальной ленты / Р.Н. Сайфуллин, М.Н. Фархиаатов, И.Р. Гаскаров // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 125. – С. 166–170.

27. Сайфуллин, Р.Н. Модернизация электроконтактной установки для термомеханического упрочнения / Р.Н. Сайфуллин, Л.Ф. Исламов, Р.Ш. Набиуллин // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: сб. науч. трудов междунар. науч.-практ. конф. – Саранск: Ин-т механики и энергетики, 2016. – С. 95–99.

28. Ignatiev, A.G. Residual stress measurements using elasto-plastic indentation and ESPI / A.G. Ignatiev, V.V. Erofeev, A.A. Tretyakov // *Materials Science Forum*. – 2016. – Vol. 843. – P. 161–166. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.843.161

29. Игнатъев, А.Г. Новая методика измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях с использованием конического индентора / А.Г. Игнатъев, А.А. Третьяков // Контроль. Диагностика. – 2015. – № 6. – С. 26–30. DOI: 10.14489/td.2015.06.pp.026-030

30. Козаев, В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / В.П. Козаев. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.

31. Методика усталостных испытаний конструктивно подобных образцов на современном оборудовании / А.В. Ерпалов, Л.А. Шефер, Е.Е. Рихтер, П.А. Тараненко // Научный поиск: материалы 7-й науч. конф. аспирантов и докторантов. – Челябинск: ЮУрГУ, 2015. – С. 166–172.

32. Фархиаатов, М.Н. Определение остаточных напряжений покрытий, нанесенных электроконтактной приваркой ленты из коррозионно-стойких сталей / М.Н. Фархиаатов // Вестник Оренбург. гос. ун-та. – 2006. – № 10–2 (60). – С. 403–409.

Игнатъев Андрей Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Техническая механика», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, ignatevag@susu.ru.

Третьяков Андрей Алексеевич, ведущий инженер-конструктор, ООО «ДСТ-Урал», г. Челябинск, tod.06@mail.ru.

Поступила в редакцию 31 января 2018 г.

DOI: 10.14529/engin180107

INCREASING THE LIFE OF RESTORED MACHINE PARTS BY RESIDUAL STRESS MANAGEMENT

A.G. Ignatiev¹, ignatevag@susu.ru,

A.A. Tretyakov², tod.06@mail.ru

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

²DST-Ural LLC, Chelyabinsk, Russian Federation

Restoration of machine parts ensures the repeated use of up to 70 % of worn parts. Restoration of machine parts is economically efficient; the cost of restoration usually does not exceed 30 % of the cost of new parts. However, the application of most restoration methods and technologies leads to a decrease in their life in comparison with new ones. For high-loaded shafts the fatigue resistance is the main factor determining their life. The state of the surface layer is the main

factor affecting the fatigue strength of the parts. The dominant role in increasing the fatigue resistance of the machine restored parts belongs to the physical and mechanical properties of the surface layer, hardening and residual stresses.

The article considers the restoration technology using electro-contact welding of a metal strip. Data on the surface residual stresses resulting from the welding of the coating are obtained. The results of measurements showed a high loading of the surface layer. The ways of residual stresses reduction in the restored parts using surface plastic deformation and electro-contact hardening are considered. The use of electro-contact hardening is recommended to improve the fatigue life of restored parts using electro-contact welding of metal tape. The application of this process allows increasing the endurance limit of the restored parts in 1.5...2.5 times.

Keywords: restoration of machine parts, fatigue life, fatigue strength, residual stresses, surface plastic deformation, electro-contact hardening.

References

1. Panteleev F.I., Lyalakin V.P., Ivanov V.P., Konstantinov V.M. *Vosstanovleniye detaley mashin* [Restoration of Machine Parts]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2003. 672 p.
2. Ivanov V.P. *Tekhnologiya i oborudovaniye vosstanovleniya detaley mashin* [Technology and Equipment for the Restoration of Machine Parts]. Moscow, Technoprospect Publ., 2007. 458 p.
3. Odintsov L.G. *Uprochneniye i otdelka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniyem* [Hardening and Finishing of Parts by Surface Plastic Deformation]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1987. 328 p.
4. Pronikov A.S. *Nadezhnost' mashin* [Reliability of Machines]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1978. 592 p.
5. Kolasa A., Sarnowski T., Cegielski P. Regeneration of Worn out Machine Parts Surfaces by Automatic Welding. *Przegląd spawalnictwa*, 2015, vol. 87, no. 1, pp. 50–57.
6. Voynash S.A., Gaydukova P.A., Markov A.N. Rational Route Choosing Methodology for Machine Parts Restoration and Repair. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 206, pp. 1747–1752. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.708
7. Korotkov V.A. Properties and Commercial Application of Manual Plasma Hardening. *Metal Science and Heat Treatment*, 2016, vol. 58, no. 7–8, pp. 449–454. DOI: 10.1007/s11041-016-0033-5
8. Saifullin R.N., Yunusbaev N.M., Nabiullin R.Sh. [Repairing and Hardening of Farm Machinery Parts by Applying the Electric Contact Welding]. *Vestnik BSAU*, 2016, no. 3, pp. 89–93. (in Russ.)
9. Roberts J.L. *Residual Stress Effects on Fatigue Life Via the Stress Intensity Parameter*, PhD diss. University of Tennessee, 2002. Available at: http://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/2196.
10. Nguyen T.N., Wahab M.A. The Effect of Weld Geometry and Residual Stresses on the Fatigue of Welded Joints under Combined Loading. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, vol. 300, no. 3, pp. 201–208. DOI: 10.1016/S0924-0136(97)00418-4
11. Watanabe O., Matsumoto S., Nakano Y., Saito Y. Fatigue Strength of Welded Joints in High Strength Steel Effects of Stress Concentration Factor and Welding Residual Stress. *Welding International*, 1996, vol. 10, no. 3, pp. 201–206. DOI: 10.1080/09507119609548979
12. Ghanem F., Braham C., Fitzpatrick M.E., Sidhom H. Effect of Near-Surface Residual Stress and Microstructure Modification from Machining on the Fatigue Endurance of a Tool Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2002, vol. 11, no. 6, pp. 631–639. DOI: 10.1361/105994902770343629.
13. Krebs J., Kassner M. Influence of Welding Residual Stresses on Fatigue Design of Welded Joints and Components. *Welding in the World*, 2007, vol. 51, no. 7/8, pp. 54–68. DOI: 10.1007/BF03266586
14. Fricke W. Effects of Residual Stresses on the Fatigue Behavior of Welded Steel Structures. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2005, vol. 36, no. 11, pp. 642–649. DOI: 10.1002/mawe.200500933
15. Zhanga W., Jianga W., Zhaob X., Tu S.-T. Fatigue Life of a Dissimilar Welded Joint Considering the Weld Residual Stress: Experimental and Finite Element Simulation. *International Journal of Fatigue*, 2018. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.01.002
16. Sonsino C.M. Effect of Residual Stresses on the Fatigue Behavior of Welded Joints Depending on Loading Conditions and Weld Geometry. *International Journal of Fatigue*, 2009, vol. 31, no. 1, pp. 88–101. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2008.02.015
17. Savaria V., Bridier F., Bocher P. Predicting the Effects of Material Properties Gradient and Residual Stresses on the Bending Fatigue Strength of Induction Hardened Aeronautical Gears. *International Journal of Fatigue*, 2015. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.12.004

18. Barsoum Z., Barsoum I. Residual Stress Effects on Fatigue Life of Welded Structures Using LEFM. *Engineering Failure Analysis*, 2009, vol. 16, no. 1, pp. 449–467. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.06.017
19. Liljedahl C.D.M., Brouard J., Zanellato O. Weld Residual Stress Effects on Fatigue Crack Growth Behaviour of Aluminium Alloy 2024-T351. *International Journal of Fatigue*, 2009, vol. 31, no. 6, pp. 1081–1088. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2008.05.008
20. Vinokurov V.A., Grigoriantz A.G. *Teoriya svarochnykh deformatsiy i napryazheniy* [Theory of Welding Deformations and Stresses]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1984. 280 p.
21. Vishnyakov Ya.D., Piskarev V.D. *Upravleniye ostatochnymi napryazheniyami v metallakh i splyavakh* [Management of Residual Stresses in Metals and Alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1989. 254 p.
22. Bellow D.G., Wahab N., Faulkner M.G. Residual Stresses and Fatigue of Surface Treated Welded Specimens. *Advances In Surface Treatment*, 1986, vol. 2, pp. 85–94.
23. Sarkaki Shahram, Lutes Loren D. Residual Stress Effects in Fatigue of Welded Joints. *Journal of Structural Engineering*, 1988, vol. 11, iss. 2, pp. 462–474. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:2(462)
24. Saifullin R.N. Farkhshatov M.N. [Properties of Coatings Obtained by Electro-Contact Welding Filler Materials from Steel Strips]. *Uprochnyayushchiye tekhnologii i pokrytiya*, 2014, no. 3 (111), pp. 13–16. (in Russ.)
25. Ignatiev A.G., Korotkov V.A., Ignatiev G.S. [Accounting Residual Stresses by Improving Technologies of Parts Recovering]. *Traktory i sel'khoz mashiny*, 2009, no. 8, pp. 47–49. (in Russ.)
26. Saifullin R.N., Farkhshatov M.N., Gaskarov I.R. [Experience in Restoring Worn Parts with Electro-Contact Welding of Steel Tape]. *Trudy GOSNITI*, 2016, vol. 125, pp. 166–170. (in Russ.)
27. Sayfullin R.N., Islamov L.F., Nabiullin R.Sh. [Modernization of the Electrocontact Equipment for Thermomechanical Hardening]. *Energoeffektivnyye i resursosberegayushchiye tekhnologii i sistemy: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy-Efficient and Resource-Saving Technologies and Systems: Materials of the International Scientific-Practical Conference]. Saransk, Institute of Mechanics and Energy Publ., 2016, pp. 95–99. (in Russ.)
28. Ignatiev A.G., Erofeev V.V., Tretyakov A.A. Residual Stress Measurements Using Elasto-Plastic Indentation and ESPI. *Materials Science Forum*, 2016, vol. 843, pp. 161–166. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.843.161
29. Ignatiev A.G., Tretyakov A.A. [A New Technique for Residual Stress Measurements in Restored Parts Using a Cone Indenter]. *Kontrol'. Diagnostika*, 2015, no. 6, pp. 26–30. (in Russ.) DOI: 10.14489/td.2015.06.pp.026-030
30. Kogaev V.P. *Raschety na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni* [Calculations for Strength at Stresses Variables in Time]. Moscow, Metallurgy Publ., 1977. 232 p.
31. Erpalov A.V., Shefer L.A., Rikhter E.E., Taranenko P.A. [Fatigue Testing Method for Constructively Similar Samples on Modern Equipment]. *Nauchnyy poisk: materialy 7th nauchnoy konferentsii aspirantov i doktorantov* [Scientific Search: Materials of the 7th Scientific Conference of Postgraduate Students and Doctoral Students]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2015, pp. 166–172. (in Russ.)
32. Farkhshatov M.N. [Determination of Residual Stresses of Coatings Applied by Electro-Contact Welding of a Strip of Corrosion-Resistant Steels]. *Bulletin of the Orenburg State University*, 2006, no. 10–2 (60), pp. 403–409. (in Russ.)

Received 31 January 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Игнатъев, А.Г. Повышение долговечности восстановленных деталей машин на основе управления остаточными напряжениями / А.Г. Игнатъев, А.А. Третьяков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 58–67. DOI: 10.14529/engin180107

FOR CITATION

Ignatiev A.G., Tretyakov A.A. Increasing the Life of Restored Machine Parts by Residual Stress Management. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 58–67. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin180107