

УДК 629.113.004

Т. В. Вигерина

ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛА ПОКРЫТИЙ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

Представлены результаты, отражающие влияние операции поверхностного пластического деформирования, проводимой после наплавки восстанавливаемых шеек коленчатых валов. Показано, что формируемая структура покрытия, полученная с использованием оптимальных режимов наплавки и последующей обработки, повышает усталостную прочность восстановленных коленчатых валов на 25...30 % и износостойкость покрытий на 10...15 %.

Введение

В настоящее время 50...80 % всех известных способов восстановления деталей машин связаны с различными способами наплавки [1]. Наплавленные покрытия труднообрабатываемы и приводят к снижению усталостной прочности восстановленной детали. Это следует из характерных дефектов наплавленных слоев металла, к которым относят пористость, наличие трещин, неоднородность химического состава, структуры и наводороживание с возникновением растягивающих остаточных напряжений. Применение поверхностного пластического деформирования (ППД) в качестве одной из операций чистовой обработки наплавленных поверхностей может уменьшить некоторые из приведенных дефектов, благодаря чему в поверхностном слое возникают сжимающие напряжения, способствующие повышению усталостной прочности деталей на 30...70 % и износостойкости в 1,5...2,0 раза со значительным снижением шероховатости поверхности упорчаемой детали. В результате применения ППД в технологии восстановления деталей возможно восстановление эксплуатационных свойств до показателей новых деталей. С помощью ППД дисками можно повысить износостойкость покрытий, наплавленных в среде защитных газов (CO_2) или под слоем флюса, примерно в 2 раза.

Цель работы – повышение эксплуатационных характеристик (износостойкости и усталостной прочности) восстанавливаемых наплавкой коленчатых валов за счет введения операции поверхностного пластического деформирования в качестве чистовой и упорчающей операции.

Оборудование и методики исследования

Для испытаний покрытия наносили на коренные шейки коленчатого вала (материал – сталь 45) с помощью наплавки в среде [$\text{Ar} + (20...30 \% \text{CO}_2)$]. После наплавки шеек проводили их шлифование на круглошлифовальном станке мод. 3A151 до диаметра $70_{-0,019}$ и шероховатости $Ra\ 0,32...0,63$ мкм. Далее из них вырезали на токарном станке 16К20 образцы цилиндрической формы высотой 15 мм.

Интенсивность изнашивания определяли на машине трения СМЦ-2 по схеме «диск–колодка» путем измерения массовой интенсивности изнашивания по ГОСТ 17364. В качестве контртела использовали вкладыши подшипников, из которых вырезали фрагменты размерами 12×12 мм. Биметаллические вкладыши представляют собой стальную основу, плакированную алюминиевым сплавом АО20-1.

В качестве смазки исследуемой пары трения применяли масло индуст-

риальное И-20А (ГОСТ 8581-78), которое вводили в зону трения без давления, с помощью частичного погружения образцов в масляную ванну, т. е. создавали режим смешанного трения, дающего на основании анализа работы подшипников скольжения наибольший износ. С целью ужесточения режимов испытаний в масло добавляли (0,5 % по массе) абразивные частицы SiO_2 и Al_2O_3 размером менее 30 мкм. Скорость скольжения составляла 2,68 м/с. Давление на трущихся поверхностях было определено по условию прочности материала вкладыша и составляло 9 МПа.

Восстановление валов производится после выработки ими межремонтного ресурса. Микроструктура их материала отличается от микроструктуры материала новых валов наличием большего количества дефектов, которые впоследствии могут служить источником зарождения усталостных трещин и снижать усталостную прочность детали. Поэтому образцы, изготовленные из стали 45, перед наплавкой подвергались предварительному циклическому нагружению, а затем испытывались. Число циклов нагружения $N = 1,8 \cdot 10^5$, амплитуда переменных нагружений $\sigma_a = 120$ МПа. Исследования проводились в области многоциклового усталости по методикам, предложенным в [2].

Усталостные испытания проводились на машине УКИ-10М, которая позволяла задавать образцу необходимые переменные напряжения с одновременной фиксацией количества циклов в любой момент испытаний [3]. В качестве предела выносливости σ_{-1} при симметричном цикле нагружения принималось такое наибольшее значение амплитуды переменных напряжений, при котором образцы не ломаются до базы испытания. База испытаний составляла 10^7 циклов.

Основная часть

Прирост твердости после ППД зависит от содержания углерода, а также легирующих элементов в стали. Для углеродистых сталей он больше, чем для легированных сталей, при одном и том же содержании углерода. Это связано с искажениями кристаллической решетки в результате внедрения легирующей добавки, которая затрудняет перемещение дислокаций во время ППД.

Обкаточный ролик под влиянием усилия прижима, действующего в обрабатываемой системе, вызывает в зоне контакта с обрабатываемой деталью местную как упругую, так и пластическую деформации. Из-за большой твердости обрабатываемого элемента деформации имеют место в поверхностном слое детали. В результате деформации происходит изменение исходной формы и ориентации зерен (рис. 1, а, б).

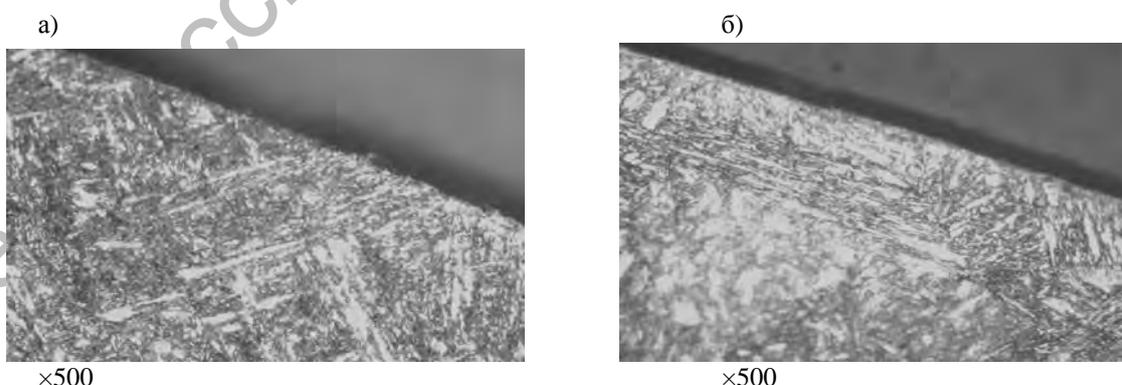


Рис. 1. Верхний слой образцов: а – наплавленный без ППД; б – наплавленный с последующим ППД

Зерна подвергаются сплющиванию и вытягиванию в направлении максимальной деформации с анизотропией механических свойств, происходит изменение ориентации структурных составляющих вдоль обрабатываемой поверхности под влиянием контактного давления.

Размеры зерен уменьшаются в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности, и увеличиваются в направлении, совпадающем с направлением поверхностной пластической обработки.

Пластическая деформация распространяется от поверхности детали на глубину, зависящую от пластических свойств материала и усилия деформи-

рования (рис. 2). Она проявляется как результат наличия дислокаций и их перемещений [4, 5]. Кристаллиты дробятся на фрагменты и блоки с большим искажением кристаллической решетки. Этот процесс протекает до определенного состояния, зависящего от вида обрабатываемого материала. Если плотность дефектов достигает граничного значения, то способность кристаллической решетки к дальнейшему деформированию исчерпывается. В таком случае дальнейшее увеличение давления приводит к измельчению зерен или к перемещению кристаллов относительно друг друга, что способствует возникновению несплошностей в материале в виде микротрещин.

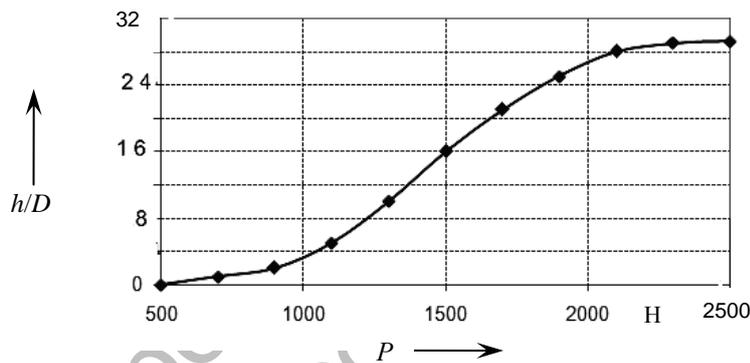


Рис. 2. Зависимость относительной глубины пластической деформации h/D от усилия прижатия обкаточного ролика P

Зависимость толщины деформированного слоя от усилия прижатия ролика носит нелинейный характер. Условно график можно разделить на три участка. На первом участке ($P = 500 \dots 1000$ Н) толщина деформированного слоя с увеличением усилия прижатия ролика изменяется незначительно, что объясняется преимущественно смятием микронеровностей. На втором участке ($P = 1000 \dots 2000$ Н) зависимость носит примерно линейный характер, т. е. с увеличением усилия прижатия ролика пропорционально ему увеличивается и толщина деформированного слоя. На третьем участке ($P > 2000$ Н) с увеличе-

нием усилия прижатия ролика толщина деформированного слоя практически не изменяется, т. к. верхний слой материала имеет ограниченную способность к аккумуляции энергии деформирования и по мере последовательной деформации наступает состояние энергетического насыщения. Дальнейшее увеличение усилия или количества ходов при поверхностной пластической обработке может привести к отслоению поверхности.

Упрочнение материала при деформации можно объяснить с помощью дислокационной теории [5], из которой следует, что дислокации концентриру-

ются возле линий скольжения. Около дислокаций образуются поля напряжений, поэтому для дальнейшего их распространения необходимо приложение большего усилия по сравнению с неупрочненным материалом. Перемещающиеся дислокации задерживаются, если

встречают на своем пути препятствия в виде других дислокаций, границ зерен или стенок кристаллов, что объясняет повышение усталостной прочности после ППД и подтверждается экспериментальными данными (рис. 3).

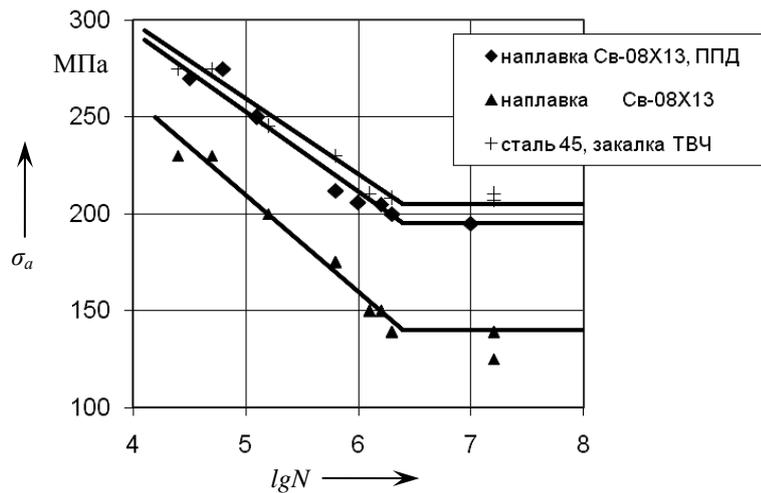


Рис. 3. Кривые усталости образцов: упрочненных закалкой ТВЧ, наплавленных без упрочнения, наплавленных с упрочнением ППД; σ_a – амплитуда переменных напряжений; N – число циклов нагружения до разрушения образца

В результате наклепа под влиянием контактного давления преимущественная ориентация структурных составляющих из радиального направления изменяется на ориентацию вдоль обрабатываемой поверхности, что с увеличением плотности дислокаций с $0,56 \cdot 10^7$ до $0,71 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ препятствует росту усталостных трещин.

Твердость покрытия, полученного наплавкой проволоки Св-08Х13, составляет HRC 20–22. Микроструктура покрытия из нее представляет собой ферритно-мартенситную структуру с карбидами металлов. Сплавы с подобной структурой (с низким содержанием углерода) имеют способность к значительному увеличению твердости, прочности и износостойкости в результате наклепа материала (при его пластическом деформировании со значительны-

ми степенями деформации). ППД после наплавки проволокой Св-08Х13 повышает износостойкость на 10...15 % за счет повышения твердости покрытия.

После обкатывания покрытия роликом твердость покрытия увеличивается до HRC 35–38, которая ниже твердости поверхности стали 45 после закалки ТВЧ (HRC 48–55), но в данном случае конечной целью является обеспечение износостойкости покрытия, поэтому важную роль играет материал вкладыша АО20-1, который работает в сопряжении с шейками коленчатого вала. По [6], твердость материала, работающего в паре с антифрикционным покрытием из алюминия, не более HRC 45. Графики, показывающие зависимость интенсивности изнашивания от различных способов обработки поверхности, приведены на рис. 4.

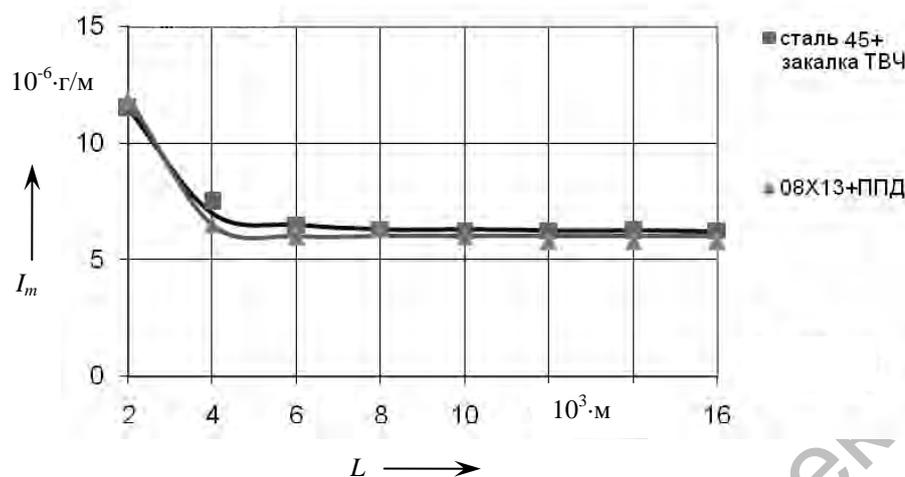


Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания образцов I_m , прошедших упрочняющую обработку, от пути трения L

Структурное состояние износостойкого наплавленного материала в основном определяется его составом, однако влияние оказывают и режимы наплавки. Увеличение погонной энергии при наплавке, увеличение силы сварочного тока, уменьшение скорости подачи наплавочной проволоки приводят к увеличению длительности существования ванночки жидкого металла и уменьшению скорости охлаждения наплавленного металла, что увеличивает размеры кристаллизующихся фаз. Скорость охлаждения оказывает влияние на остаточные внутренние напряжения, возникающие в наплавленном слое, т. е. режимы наплавки должны быть жестко регламентированы с целью предотвращения ухудшения свойств наплавленного металла. Поэтому была проведена оптимизация режимов наплавки покрытия и последующего ППД с использованием полного факторного эксперимента по методу крутого восхождения. Параметрами оптимизации были выбраны предел выносливости детали σ_{-1} и интенсивность изнашивания I_m покрытия. В качестве переменных факторов при

наплавке и деформировании приняты: сила тока I (x_1), скорость подачи проволоки v_{np} (x_2), сила прижатия ролика к заготовке P (x_3). Получены уравнения регрессии в кодированных переменных:

$$\sigma_{-1} = 161,875 + 5,375x_1 - 4,625x_2 + 21,875x_3 - 4,575x_1x_3; \quad (1)$$

$$I_m = 5,86 - 0,094x_2 - 0,231x_3. \quad (2)$$

Проверка значимости коэффициентов регрессии осуществлялась по критерию Стьюдента, расчет адекватности модели – по критерию Фишера.

Расчетные значения критерия Фишера F для уравнений (1) и (2) равны 3,28 и 2,02 соответственно, его табличное значение $F_{табл} = 3,8$, доверительный интервал коэффициентов регрессии $\Delta b_j = \pm 2,28$ и $\pm 0,047$ соответственно.

Коэффициент корреляции между σ_{-1} и I_m составляет $-0,798$.

Оптимальные режимы наплавки $I = 205$ А, $v_{np} = 194$ м/ч, $P = 2,9$ кН обеспечивают предел выносливости (при консольном нагружении) 205 МПа и интенсивность изнашивания материала покрытия $5,5 \cdot 10^{-6}$ г/м.

Заклучение

Восстановление шеек стальных коленчатых валов проволокой Св-08Х13 в среде защитных газов с силой тока 205 А и скоростью подачи проволоки 194 м/ч с последующим упрочнением ППД с силой его прижатия ролика 2900 Н обеспечило повышение износостойкости на 10...15 % и усталостной прочности на 25...30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пшибыльский, В. В.** Технология поверхностной пластической обработки / В. В. Пшибыльский. – М. : Металлургия, 1991. – 479 с.
2. **Когаев, В. П.** Прочность и износостойкость деталей машин : учеб. пособие для

машиностроительных специальностей вузов / В. П. Когаев, Ю. Н. Дроздов. – М. : Высш. шк., 1991. – 319 с.

3. **Школьник, Л. М.** Методика усталостных испытаний : справочник / Л. М. Школьник. – М. : Металлургия, 1978. – 304 с.

4. **Кожуро, Л. М.** Обработка износостойких покрытий / Л. М. Кожуро, Ж. А. Мрочек, М. Л. Хейфец. – Минск : Дизайн ПРО, 1997. – 208 с.

5. **Кравчук, В. С.** Сопротивление деформированию и разрушению поверхностно-упрочненных деталей машин и элементов конструкций / В. С. Кравчук, Абу Айаш Юсеф, А. В. Кравчук. – Одесса : Астропринт, 2000. – 160 с.

6. **Орлов, П. И.** Основы конструирования : справ.-метод. пособие в 2 кн. / П. И. Орлов ; под ред. П. Н. Учаева. – 3-е изд. – М. : Машиностроение, 1988. – Кн. 2. – 445 с.

Полоцкий государственный университет
Материал поступил 05.04.2011

T. V. Vigerina

The influence of surface plastic deformation of the material of coatings upon operational characteristics of crankshafts

The paper investigates the influence of the operation of surface plastic deformation, performed after building-up welding of restored crankshaft necks. It is shown that the formed coating structure, produced by using optimum modes of building-up welding and subsequent machining, increases the fatigue strength of crankshafts, being restored, by 25...30 % and wear resistance of coatings by 10...15 %.