

УДК 621.787.4

**ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
НА ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УПРОЧНЯЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ШЕЕК КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ**

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, канд. техн. наук, доц. А.П. КАСТРЮК,  
канд. техн. наук, доц. О.П. ШТЕМПЕЛЬ, канд. техн. наук Т.В. ВИГЕРИНА  
(Полоцкий государственный университет)*

*Исследуется влияние поверхностного пластического деформирования на микропрофиль упрочняемой поверхности, ее шероховатость и изменения кривой опорной поверхности. Обосновывается микроструктура покрытия, получаемая наплавкой низкоуглеродистой легированной проволокой в среде защитных газов, которая имеет высокую склонность к деформационному упрочнению. Определена степень пластической деформации и получена зависимость относительной глубины пластической деформации от усилия прижатия обкаточного ролика, что позволило рекомендовать оптимальное значение усилия прижатия ролика. Для упрочнения шеек коленчатых валов разработана специальная оснастка, включающая два обкаточных ролика, использование которых позволяет получить требуемое контактное давление при меньших усилиях прижатия инструмента, провести обработку в условиях ограниченного осевого перемещения и повысить предел выносливости валов, восстановленных наплавкой.*

**Введение.** Строение поверхностного слоя твердых тел и происходящие в нем явления играют особую роль в протекании большинства процессов старения и разрушения материалов. Состояние поверхностного слоя определяет процессы, возникающие при взаимодействии его с другим телом или с окружающей средой, например, при изнашивании, контактном деформировании, коррозии и др. Кроме того, многие виды разрушения всего тела детали начинаются с поверхности и зависят от ее состояния. Поверхностный слой формируется в результате разнообразных технологических процессов, которые не только образуют необходимую форму поверхности и изменяют свойства материала, но и вызывают ряд побочных явлений, изменяющих свойства твердого тела у его поверхности. Физико-химические параметры поверхностного слоя, его структура и напряженное состояние, как правило, сильно отличаются от свойств всего объема материала.

В настоящее время 50...80 % всех известных способов восстановления деталей машин связаны с различными способами наплавки [1]. Наплавленные покрытия труднообрабатываемы и обладают пониженной усталостной прочностью. Это определяют характерные дефекты наплавленных слоев металла, к которым относят пористость, трещины, неоднородность химического состава и структуры, наводороживание с возникновением растягивающих остаточных напряжений. Применение поверхностного пластического деформирования (ППД) в качестве одной из операций чистой обработки наплавленных поверхностей может уменьшить влияние некоторых из приведенных дефектов и снизить или исключить влияние негативных побочных эффектов, возникающих при обработке детали. После ППД в поверхностном слое возникают сжимающие напряжения, способствующие повышению усталостной прочности деталей на 25...30 % и износостойкости – в 1,3...1,5 раза со снижением шероховатости поверхности упрочняемой детали. В результате применения упрочнения 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 (СО<sub>2</sub>) или под слоем флюса, примерно в 1,5 раза [2].

Благодаря применению ППД выглаживанием было достигнуто повышение износостойкости деталей двигателей внутреннего сгорания в 1,2...1,4 раза по сравнению с износостойкостью таких же деталей, но после наплавки и шлифования. Обкатывание (для внутренних поверхностей – раскатывание) выполняют с помощью шарикового или роликового инструмента на токарно-винторезных станках, при этом инструмент устанавливают на суппорте станка. Способ увеличивает микротвердость поверхностного слоя на 40...60 % и глубину упрочненного слоя до 2,5 мм. Однако различные материалы обладают разной склонностью к упрочнению ППД, и выбор материала, микроструктура которого после наплавки будет обладать высокой способностью к упрочнению, является важным этапом при разработке технологии восстановления деталей и оказывает влияние на улучшение геометрических параметров упрочняемой поверхности.

Для поверхностного пластического деформирования чаще всего используют дисковые обкатники, которые устанавливаются в резцедержателе универсального токарно-винторезного станка и применяются для чистой и упрочняющей обработки заготовок. Однако из-за особенностей геометрии упрочняемых шеек вала (небольшая длина и наличие шеек) их обработка существующими видами роликов затруднена.

Цель данной работы – улучшение геометрических параметров упрочняемой поверхности поверхностным пластическим деформированием, обоснование материала, который после наплавки формирует микроструктуру, обладающую высокой склонностью к упрочнению, проектирование приспособлений, которые позволят упрочнить как галтели, так и цилиндрические поверхности шеек коленчатых валов в условиях ограниченного пространства для размещения инструмента

Упрочнение восстановленных поверхностей деталей проводилось поверхностным пластическим деформированием спроектированными обкаточными роликами в составе приспособления для галтелей (рис. 1) и цилиндрической поверхности (рис. 2).

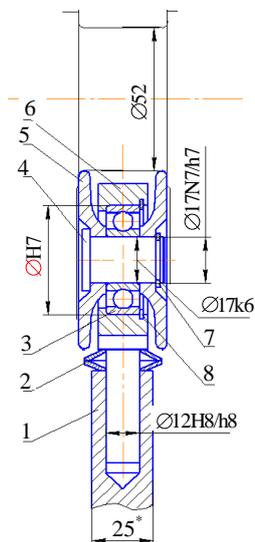


Рис. 1. Ролик для ППД галтелей коленчатого вала:  
1 – державка; 2 – пружина тарельчатая; 3 – подшипник;  
4 – ось; 5 – ролик; 6 – корпус; 7 и 8 – кольца стопорные

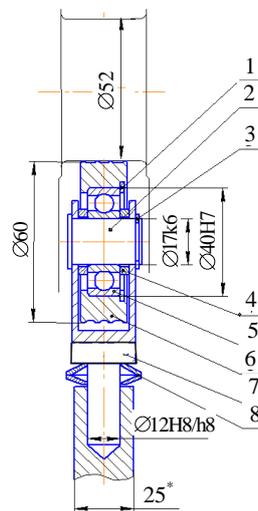


Рис. 2. Ролик для ППД шеек коленчатого вала:  
1 и 3 – кольца стопорные; 2 – ось; 4 – кольцо;  
5 – подшипник; 6 – ролик; 7 – корпус; 8 – пружина

Коленчатые валы устанавливали на токарно-винторезный станок 16К20 в центросместителях при обкатке шатунных шеек и в центрах при обработке коренных шеек. Приспособление устанавливали в резцедержатель, державка роликов 1 (см. рис. 1) использовалась как при обкатке галтелей, так и при обработке цилиндрической части шейки, а сами ролики были съемными (пат. Респ. Беларусь № 7958). Рабочая поверхность ролика для обкатывания цилиндрической части восстанавливаемой шейки выполнена в виде чередующихся выступов и впадин, что позволяет обеспечить требуемое контактное давление с меньшими усилиями за счет уменьшения площади контактной поверхности.

При упрочняющем обкатывании роликом степень деформации определялась из соотношения:

$$\varepsilon = \frac{b}{2 \cdot r} \leq 0,4 \dots 0,6,$$

где  $b$  – ширина единичной канавки, возникающей как след от обкатки роликом, мм;  $r$  – профильный радиус ролика, мм.

Для измерения шероховатости и записи профиля поверхностей изделий использовали профилограф-профилометр АБРИС-ПМ7. Измерение производилось в соответствии с требованиями ГОСТ 2789-73.

Сила, необходимая для упрочняющего ППД, определялась расчетным методом, предложенным в работе [2].

Определение плотности дислокаций в покрытии производилось на дифрактометре общего назначения ДРОН-3.0 в  $\text{CuK}_\alpha$  монохроматизированном излучении, вторичная монохроматизация осуществлялась пиролитическим графитом с вращением образца в собственной плоскости. Для определения фазового состава исследуемых образцов проводилась съемка полной рентгенограммы в непрерывном режиме с шагом по углу  $0,1^\circ$ . Интервал углов  $2\Theta = 10 \dots 120^\circ$  выбирался с учетом нахождения линий предполагаемых фаз картотеки *ASTM* (электронная версия *PCPDFWIN 2.0*). Сбор и обработка информации осуществлялись с помощью программы «WinDif».

**Основная часть.** Наплавка в большинстве случаев позволяет получить покрытия с высокой износостойкостью. Для того чтобы достичь предела выносливости валов, не уступающего пределу выносливости новых изделий, в технологический процесс восстановления вводят термические операции, которые способствуют снятию внутренних напряжений, улучшают механические свойства наплавленного мате-

риала и зоны термического влияния. Основным недостатком этих процессов является их большая энергоемкость. Отрицательное влияние наплавки на структуру получаемых износостойких покрытий также можно значительно снизить, применяя в технологии ремонта методы упрочняющей поверхностной пластической обработки, в частности ППД. Наплавка приводит к появлению в металле внутренних остаточных напряжений и связанных с ними деформаций. Эти напряжения возникают вследствие неравномерности нагрева металла, а также из-за его структурных превращений.

Минимальная склонность к упрочнению, оцениваемая отношением твердости материала по Виккерсу  $HV$  после деформирования к твердости до деформирования при ППД, наблюдается в сталях с сорбитной структурой. При этом степень упрочнения в виде относительного прироста твердости  $(\Delta H/H) \cdot 100\%$  достигает  $\sim 15\%$  [2; 3]. Перлитные структуры также характеризуются небольшой способностью к упрочнению (18...45%). Мартенситная структура имеет более высокую склонность к упрочнению (20...50%) и пригодна для ППД. Деформирование мартенситной структуры связано не только с пластической деформацией, но и с частичным превращением остаточного аустенита в мартенсит и выделением мелкодисперсных карбидов (по границам плоскостей скольжения), в результате чего повышается плотность дислокаций. Максимальная склонность к упрочнению наблюдается у ферритно-перлитной структуры (до 100%), которая наиболее пригодна для ППД.

Термически улучшенные стали с сорбитной структурой, несмотря на малую склонность к деформационному упрочнению, могут подвергаться поверхностному деформированию, однако глубина упрочнения таких сталей меньше, чем для подвергаемых ППД при таких же условиях сталей после нормализации. Кроме того, во время ППД качением термически улучшенных сталей с сорбитной структурой существует опасность шелушения поверхности. Поэтому выбор параметров поверхностной пластической обработки для этих сталей должен быть выполнен очень тщательно на основе результатов эксперимента.

При наплавке низкоуглеродистыми сталями структурные превращения отсутствуют, поэтому имеют место лишь тепловые напряжения. Как правило, материал наплавленного покрытия сильно отличается от основного по химическому составу. При наплавке покрытия из стали Св-08Х13 на вал, изготовленный из стали 45, на деформации и напряжения существенное влияние оказывают разница в температурных коэффициентах линейного расширения основного и наплавленного металлов, а также увеличение объема хромистой стали вследствие ее закалки при охлаждении на воздухе. Наличие в упрочняемом материале легирующих элементов увеличивает степень искажения кристаллической решетки, а следовательно, и степень упрочнения. Поэтому для восстановления шеек стальных коленчатых валов было предложено использовать низкоуглеродистую легированную проволоку Св-08Х13, достоинствами которой являются: низкая стоимость, доступность из-за широкого использования, обеспечение возможности упрочнения, неплохая свариваемость, хорошая обрабатываемость резанием, коррозионная стойкость, не требует дополнительной подготовки к наплавке. Наплавка проволокой Св-08Х13 в среде защитных газов обеспечивает формирование микроструктуры, представляющей собой твердый раствор хрома и углерода в  $Fe_\alpha$  с мелкодисперсными включениями карбида хрома и содержанием углерода  $\leq 0,08\%$ . Эта структура обладает склонностью к высокой степени деформационного упрочнения.

При последующей обработке ППД наплавленной поверхности обкаточный ролик под влиянием усилия прижима вызывает в зоне контакта с обрабатываемой заготовкой местную как упругую, так и пластическую деформации. Из-за большой твердости обрабатываемого элемента деформации имеют место в поверхностном слое заготовки. Пластическое деформирование материала распространяется от поверхности детали на глубину, зависящую от усилия деформирования (рис. 3) и пластических свойств материала.

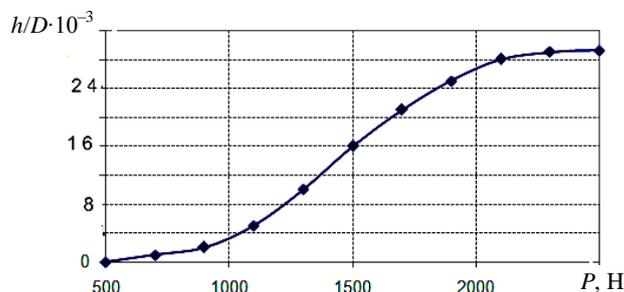


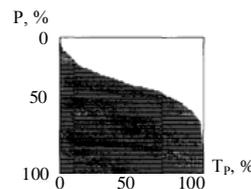
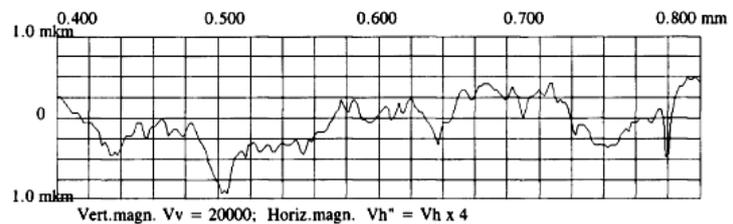
Рис. 3. Зависимость относительной глубины пластической деформации  $h/D$  от усилия прижатия обкаточного ролика  $P$

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 объясняет-

ся преимущественно смятием микронеровностей; на втором ( $P = 1000 \dots 2000$  Н) – зависимость носит примерно линейный характер; на третьем ( $P > 2000$  Н) – с увеличением усилия прижатия ролика толщина деформированного слоя практически не изменяется, так как 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 поверхностного слоя.

Способность материала к деформационному упрочнению зависит в большой степени от его структуры [3]. С увеличением содержания углерода в сталях пропорционально снижается и прирост твердости, несмотря на повышение усилия прижатия инструмента к заготовке. Степень пластической деформации  $\epsilon$  при обкатывании роликом с усилием прижатия  $P = 2850 \dots 2950$  Н составляет 0,3.

Исследования микрорельефа поверхности детали, проведенные с помощью анализа профилограмм и кривых опорных поверхностей после различных видов обработки, показали, что введение операции ППД после чистового шлифования позволяет улучшить микропрофиль поверхности: происходит смятие острых кромок микронеровностей (рис. 4), что способствует повышению износостойкости покрытия. Значение шероховатости  $Ra$  поверхности снижается на 15...18 %. Кривая опорной поверхности, которая характеризует распределение материала в шероховатом слое, становится более полой, что говорит о снижении высоты микронеровностей.



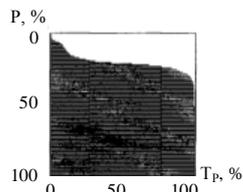
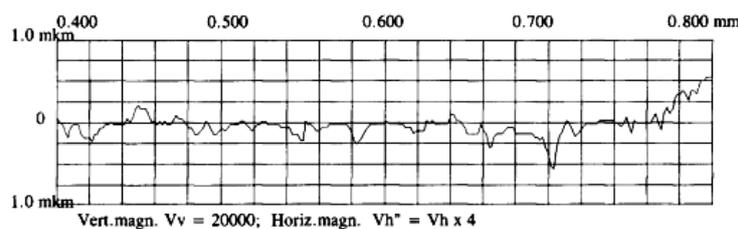
P, %	Tp, %	P, %	Tp, %
5	1,0	40	72,6
10	3,8	50	88,8
15	9,0	60	97,6
20	14,4	70	98,9
25	26,5	80	99,4
30	40,3	90	99,8

$Ra = 0.190$  mkm     $Rz = 0.916$  mkm  
 $Rmax = 1.743$  mkm     $Sm = 41.81$  mkm

Designation:

Signature:

a)



P, %	Tp, %	P, %	Tp, %
5	2,8	40	98,9
10	9,7	50	99,2
15	14,1	60	99,4
20	41,8	70	99,5
25	87,1	80	99,7
30	96,5	90	99,7

$Ra = 0.165$  mkm     $Rz = 1.075$  mkm  
 $Rmax = 2.571$  mkm     $Sm = 31.01$  mkm

Designation:

Signature:

b)

Рис. 4. Профилограммы поверхностей образцов, полученных различными методами обработки: а – шлифование + полирование; б – шлифование + ППД + полирование

В результате ППД в поверхностном слое наплавленного покрытия образуется текстура с повышенной концентрацией дефектов кристаллической решетки. Встречаясь с дефектом, дислокация обходит его, оставляя на нем дислокационную петлю, которая увеличивает сопротивление движению последующих дислокаций. Также после ППД в покрытии возникают внутренние остаточные напряжения сжатия [4; 5], которые блокируют раскрытие усталостных трещин, превращая их в нераспространяющиеся. В результате наклепа под влиянием контактного давления преимущественная ориентация структурных составляющих в радиальном направлении изменяется на ориентацию вдоль обрабатываемой поверхности по направлению действия касательных напряжений, что с увеличением плотности дислокаций с  $0,566 \cdot 10^7$  до  $0,712 \cdot 10^9$  см<sup>-2</sup> препятствует росту усталостных трещин.

**Заключение.** Обоснована получаемая наплавкой проволоки Св-08Х13 микроструктура – пересыщенный твердый раствор с мелкодисперсными включениями карбидов хрома – как обладающая склонностью к высокой степени деформационного упрочнения.

Установлено, что введение в технологию восстановления валов наплавкой операции поверхностного пластического деформирования обкаточным роликом снижает значения шероховатости на 15...18 %, улучшает микрорельеф упрочняемой поверхности и повышает предел выносливости восстановленных коленчатых валов. Разработана оснастка для поверхностного пластического деформирования шеек коленчатых валов в условиях ограниченного перемещения инструмента.

Определено, что для разработанных роликов оптимальными значениями усилия прижатия инструмента к детали является  $P = 2,85...2,95$  кН.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Молодык, Н.В. Восстановление деталей машин: справочник / Н.В. Молодык, А.С. Зенкин. – М.: Машиностроение, 1989. – 400 с.
2. Пшибыльский, В.В. Технология поверхностной пластической обработки / В.В. Пшибыльский. – М.: Металлургия, 1991. – 479 с.
3. 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.
4. Чепя, П.А. Эксплуатационные свойства упрочненных деталей / П.А. Чепя, В.А. Андрияшин. – Минск: Наука и техника, 1988. – 191 с.
5. Смелянский, В.М. Механика упрочнения поверхностного слоя деталей машин в технологических процессах поверхностного пластического деформирования / В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 1992. – 59 с.

Поступила 13.12.2013

#### INFLUENCE OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION ON GEOMETRICAL PARAMETERS WHEN RESTORING THE CRANKSHAFT BEARING JOURNALS

V. IVANOV, A. KASTRUK, O. CHTEMPEL, T. VIGERINA

*The article presents the influence of surface plastic deformation on the microprofile of a strengthened surface, its roughness and changes in the curve of the supporting surface. Justified coating microstructure obtained by welding low carbon alloy wire in shielding gases, which has a high tendency to strain hardening. The degree of plastic deformation and the dependence of the relative depth of the plastic deformation of the contact pressure run-in roller, thus recommend the best value roller pressing force. To harden journals of crankshafts developed special equipment, including two break-in. Their use allows to receive a demanded contact pressure at smaller efforts of pressing of the tool and to carry out processing in the conditions of limited axial movement and fatigue limit of shafts.*