

УДК 621.693

**ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВАЛОВ НАПЛАВКОЙ
С УЧЕТОМ ЕГО ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

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

Представлены результаты проведенного анализа химического состава материалов, используемых для восстановления валов из среднеуглеродистой стали наплавкой. Получена теоретическая зависимость величины осевой деформации элементов наплавляемого вала от модуля упругости, температуры нагрева и температурного коэффициента линейного расширения материалов восстанавливаемого изделия и покрытия, размеров наплавленного валика, на основании которой можно прогнозировать изменение осевого размера вала и ограничить количество наплавки. Определяющее влияние на остаточные напряжения оказывают температура нагрева материала покрытия и температурный коэффициент линейного расширения. В меньшей степени влияет соотношение значений модуля упругости материалов покрытия и заготовки.

Введение. Основными требованиями к деталям типа «вал» являются точность геометрических параметров рабочих поверхностей и высокие износостойкость и усталостная прочность шеек. Около 30 % валов изготавливают из среднеуглеродистой стали [1]. При эксплуатации деталей сопротивление их усталости снижается на 25...30 % [2], неизбежными явлениями также являются износ коренных и шатунных шеек. Наиболее доступный и экономически обоснованный способ восстановления шеек стальных валов при износе и наличии технологических трещин длиной не более 10...12 мм и глубиной до 3 мм, расположенных под углом менее 20° к оси вала, – наплавка легированными материалами с последующей термической и механической обработкой. Наплавка обладает высокой производительностью и позволяет получать покрытия из различных материалов, обладающих широким диапазоном свойств. Однако значительное тепловложение в материал заготовки приводит к образованию нежелательных закалочных структур, снижающих эксплуатационные характеристики деталей, в том числе предел их выносливости.

Максимальная износостойкость обеспечивается использованием гетерогенных покрытий. При наплавке происходит кристаллизация металла из легированного многокомпонентного расплава и формирование эвтектических слоев, содержащих избыточные фазы. Повышение износостойкости за счет увеличения твердости материала покрытия приводит к образованию на границе «основной металл – покрытие» микроструктур с повышенной твердостью, склонных к хрупкому разрушению.

Основными критериями при выборе наплавочного материала являются сварочно-технологические свойства, стоимость и механические характеристики нанесенного покрытия. Сплавы, которые рекомендуются для наплавки деталей [3], работающих в условиях трения скольжения, содержат основные легирующие элементы: хром, титан, бор, кремний, марганец. Если в качестве критерия качества полученного покрытия принять износостойкость, желательно использовать проволоку, легированную карбидообразующими элементами: бором, хромом, титаном. В результате наплавки такого материала получают износостойкое покрытие, имеющее эвтектоидную структуру с избыточными фазами, содержание которых зависит от количества легирующих элементов).

Хром – широко распространенный карбидообразующий элемент, имеющий сравнительно низкую стоимость. Легирование хромом снижает склонность аустенитного зерна к росту при нагреве, увеличивает прокаливаемость (за счет снижения скорости диффузии углерода) и замедляет распад мартенсита, а также способствует увеличению дисперсности структуры.

Титан образует прочные и тугоплавкие карбиды. Твердость монокарбида титана 28 ГПа, а температура плавления – 3150 °С. Наличие титана в стали уменьшает ее чувствительность к перегреву и способствует образованию мелкозернистой структуры. Титан увеличивает стойкость стали против водородной хрупкости, трещин и флокенов.

Высокая микротвердость боридов (12...37 ГПа) и малая растворимость бора в металлах обеспечивают значительное повышение твердости сплава. Наряду с обеспечением твердости, бор в составе эвтектических структур сильно охрупчивает сплавы. Охрупчивание особенно сильно наблюдается при совместном легировании бором и углеродом. При содержании бора 0,001...0,015 % масс. повышается прокаливаемость, а следовательно эффективность термообработки. Повышенная активность бора при его избытке выше предела растворимости приводит к образованию карбидов и боридов в наплавленном слое, т.е.

к упрочнению стали. Также он оказывает раскисляющее воздействие, а при его значительном количестве образуются трещины [4].

Использование карбидообразующих элементов, таких как хром, титан и молибден, значительно повышает износостойкость наплавленных покрытий.

Наличие кремния и марганца при наплавке приводит к интенсификации протекания реакций их восстановления, что снижает количество кислорода в металле.

Легирующие железо марганцем до 12 % повышает износостойкость, а также твердость и микро-твердость. Прокаливаемость марганцевых сталей увеличивается вследствие снижения критических точек из-за замедленной диффузии углерода в аустените. Однако марганец при содержании в больших количествах ухудшает наплавляемость, способствуя образованию горячих трещин.

С учетом результатов проведенного анализа в качестве изучаемого наплавочного материала предложены проволоки ПП-Нп-80Х20Р3Т и Св-08Х13 с различным содержанием углерода и легирующих элементов. Использование проволоки У7 позволяет получить твердое покрытие без карбидов и тем самым увеличить износостойкость покрытия.

Наплавку хромистыми сталями ведут с целью повышения коррозионной стойкости и придания поверхностным слоям изделия высокой износостойкости. Важной особенностью покрытий из хромистых сталей является сохранение свойств при высокой температуре. При низком содержании углерода хромистый наплавленный материал имеет мартенситно-ферритную структуру и твердость 32...35 HRC.

Наплавочные материалы, используемые для нанесения износостойких покрытий, обеспечивают покрытиям высокие твердость и износостойкость, что в значительной степени затрудняет их обработку резанием. Твердость покрытий из проволоки ПП-Нп-80Х20Р3Т составляет 45...48 HRC, а после закалки 55...60 HRC. Наплавка порошковой высокоуглеродистой проволокой позволяет повысить твердость наплавленного покрытия до HRC 45...50 и получить гетерогенную структуру – «матрица + твердые включения», оптимальную с точки зрения обеспечения износостойкости.

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. 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 на вал из-за деформации и напряжения существенное влияние оказывает разница в температурных коэффициентах линейного расширения (ТКЛР) основного и наплавленного металлов, а также увеличение объема хромистой стали вследствие ее закалки при охлаждении на воздухе. В наплавленном покрытии возникают остаточные напряжения, достигающие 700 МПа [5]. Среднее уменьшение длины коленчатого вала, установленное по данным измерений групп валов из 15...20 единиц, достигает 3 мм, что можно объяснить возникновением внутренних напряжений в материале покрытия и детали.

Таким образом, помимо формируемой микроструктуры покрытий, обеспечивающих эксплуатационные свойства деталей, необходимо учитывать и физико-механические свойства наносимых материалов и материала детали.

Цель работы – анализ влияния химического состава материала покрытия, наносимого на шейки валов при их восстановлении наплавкой, и получение зависимости, позволяющей учитывать влияние физико-механических свойств материалов основы и покрытия на деформацию восстанавливаемой детали.

Методика проведения исследований. Изучение влияния физико-механических свойств наплавляемого материала на восстанавливаемые детали проводилось при исследовании покрытий, полученных наплавкой проволокой Нп-40Х13, Св08Х13 и У7. Покрытие наплавляли на коренные шейки валов (материал – сталь 45) в среде [Ar + (20...30 % CO₂)].

Определение распределения температуры материала как на поверхности, так и в глубине деталей осуществляли моделированием наплавочных процессов на компьютере, которое реализовывалось с использованием T-FLEX-анализа, все расчёты в данной программе велись с применением метода конечных элементов. При этом между трёхмерной моделью изделия и расчётной конечно-элементной моделью поддерживалась ассоциативная связь. Параметрические изменения исходной твердотельной модели автоматическим образом переносились на сеточную конечно-элементную модель.

В работе использовался тепловой анализ, модель которого обеспечивает возможность оценки температурного поведения изделия под действием источников тепла. Тепловой анализ использовался самостоятельно для расчёта температурных или тепловых полей по объёму конструкции, а также совместно со статическим анализом для оценки возникающих в изделии температурных деформаций.

При постановке задачи в T-FLEX-анализе задавался нестационарный процесс – расчёт температурных полей осуществлялся в функции времени. При подготовке задачи задавались геометрические параметры моделируемой системы, строилась конечно-элементная сетка, аппроксимирующая геометрию конструкции.

Результаты исследований и их обсуждение. При наплавке детали нагрев наплавляемого материала и материала основы сосредоточенным источником тепла (дугой) и быстрое охлаждение расплавленного металла со скоростью в десятки и сотни градусов в секунду предшествует кристаллизации наплавленного материала. Часть тепла из зоны сплавления наплавленного материала и материала восстанавливаемой заготовки отводится вглубь заготовки. При охлаждении покрытия в нем возникают остаточные растягивающие напряжения в направлении, противоположном усадке, которые оказывают значительное влияние на образование трещин. Напряжения появляются в результате неравномерного нагрева наплавляемого материала и материала восстанавливаемой детали. Повышение скорости охлаждения наплавленных слоев сопровождается ростом напряжений, поэтому регулирование кристаллизации для измельчения структуры за счет повышения скоростей охлаждения неприемлемо. Для уменьшения растягивающих напряжений используют предварительный подогрев восстанавливаемой детали, который снижает скорость охлаждения наплавленного покрытия.

При необезличенном ремонте двигателей их коленчатые валы до шести раз подвергаются нанесению покрытий, что установлено по контрольным меткам, оставляемым рабочими на щеках валов при каждом нанесении покрытия. Наплавка и напыление покрытий с использованием источников тепла уменьшают длину восстанавливаемого вала из-за неодновременного и неравномерного нагрева и охлаждения участков детали и покрытия. Это особенно заметно для наплавленных валов, в сравнении с напыленными валами, так как для первых характерен нагрев до большей температуры с расплавлением поверхностных слоев металла восстанавливаемых шеек. Среднее уменьшение длины, установленное по данным измерений групп валов из 15...20 единиц с помощью штангенциркуля с ценой деления 0,1 мм, отображено на рисунке 1. В каждую группу входили валы с одинаковым числом наплавов шеек.

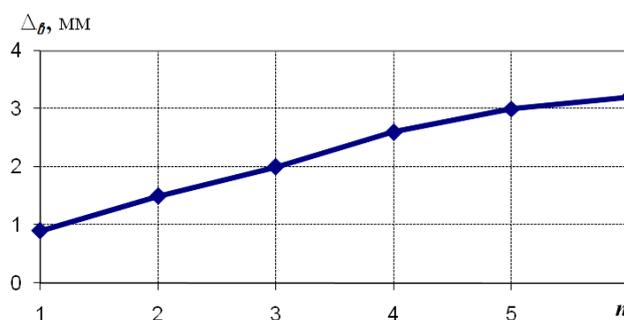


Рис. 1. Среднее уменьшение длины коленчатых валов Δ_l от числа наплавов n

Длина коленчатых валов после нескольких наплавов уменьшается до 3 мм за счет возникновения внутренних напряжений в материале покрытия и детали. В практике ремонта бывали случаи, когда восстановленный коленчатый вал невозможно было установить в блоки цилиндров при сборке двигателей. От восстановления к восстановлению длина наплавленной детали уменьшается [6].

При наплавке теплота вводится в изделие через катодное пятно нагрева. В нашем случае при восстановлении наплавкой источником теплоты является электрическая дуга – этот источник теплоты считается поверхностным, сила тока $I = 170$ А, напряжение $U = 30$ В, время наплавки одного валика $t = 40$ с. Моделирование наплавочных процессов на компьютере позволило получить графическое изображение температуры материала на его поверхности при наплавке (рис. 2).

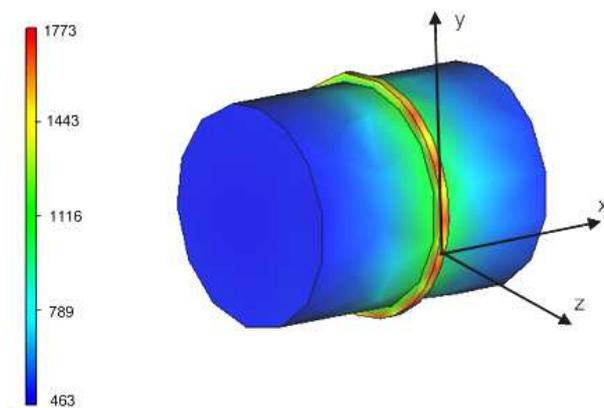


Рис. 2. Распределение температурного поля при наплавке

Для расчета деформаций в материале восстанавливаемой детали и валике наплавленного металла и внутренних напряжений в них были приняты следующие допущения:

- наплавляемый валик металла представляет собой тороидальное кольцо эллиптического сечения, имеющий металлическую связь с металлом заготовки;
- сечение валика представляет собой эллипс с осями a и b ;
- напряжения в поперечных сечениях наплавленного валика и основы деталей распределены равномерно;
- температура нагрева валика значительно выше температуры нагрева материала заготовки;
- расплавленный металл валика после нанесения кристаллизуется и охлаждается до комнатной температуры;
- взаимодействие валика с основным металлом наступило после его нанесения;
- коэффициент Пуассона μ в расчетах не учитывается.

За счет охлаждения металла валика, его размеры, в том числе ширина b , будут уменьшаться, чему препятствует участок детали диаметром $(d - a)$ и длиной b под валиком (рис. 3).

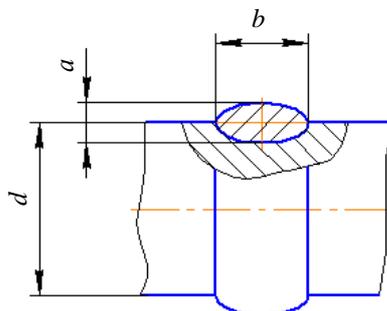


Рис. 3. Схема шейки детали с наплавленным валиком материала

Материал валика в направлении оси детали будет растянут под действием силы $P_{рс}$, а материал шейки детали под валиком сжат под действием силы $P_{сж}$ (рис. 4).

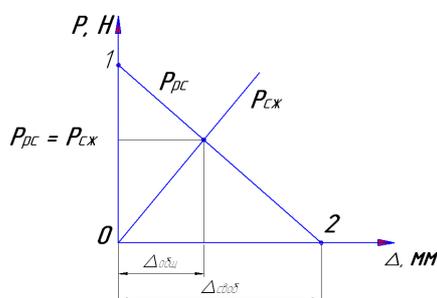


Рис. 4. Воздействие силы $P_{рс}$, растягивающей покрытие, и силы $P_{сж}$, сжимающей основной материал детали, в зависимости от деформации Δ (P – силы, возникающие при взаимодействии основы и покрытия в результате наплавки)

Деформация материала валика $\Delta_{своб}$ (м) вдоль оси детали при охлаждении в отсутствии сопротивления со стороны материала детали равна

$$\Delta_{своб} = b \cdot (t_n - t_k) \cdot \alpha, \text{ мм}, \quad (1)$$

где t_n и t_k – температура нагрева материала покрытия и комнатная температура соответственно, К; α – температурный коэффициент линейного расширения, $1 / \text{К}$.

При сопротивлении со стороны детали, когда длина сечения валика останется без изменения, напряжения растяжения σ_p в материале валика достигнут значения

$$\sigma_p = \frac{\Delta_{своб}}{b} \cdot E_g, \text{ Па}, \quad (2)$$

где E_g – модуль упругости первого рода для материала валика, Па.

Растягивающая сила P_{pc} в материале покрытия при деформации, равной $\Delta_{своб}$, составит

$$P_{pc} = \sigma_p \left[\frac{\pi \cdot (d+a)^2}{4} - \frac{\pi \cdot (d-a)^2}{4} \right] = \sigma_p \cdot \pi \cdot d \cdot a. \quad (3)$$

Зависимость силы P_{pc} от деформации Δ в виде уравнения прямой, проходящей через две точки 1 и 2 (см. рис. 4), находим из условий:

- координаты точки 1: $\left[0; (t_n - t_k) \cdot \alpha \cdot E \cdot \pi \cdot d \cdot a \right],$

- координаты точки 2: $\left[\Delta_{своб}; 0 \right],$

- уравнение прямой:

$$\frac{\Delta - 0}{\Delta_{своб} - 0} = \frac{P_{pc} - (t_n - t_k) \cdot \alpha \cdot E \cdot \pi \cdot d \cdot a}{0 - (t_n - t_k) \cdot \alpha \cdot E \cdot \pi \cdot d \cdot a}, \quad (4)$$

откуда

$$P_{pc} = \frac{(t_n - t_k) \cdot \alpha \cdot E_s \cdot \pi \cdot d \cdot a - \Delta \cdot E_s \cdot \pi \cdot d \cdot a}{b} = \frac{E_s \cdot \pi \cdot d \cdot a}{b} \cdot [(t_n - t_k) \cdot b \cdot \alpha - \Delta]. \quad (5)$$

Сила $P_{сж}$ зависит от деформации Δ следующим образом:

$$P_{сж} = \frac{\Delta}{b} \cdot E_o \cdot \frac{\pi \cdot (d-a)^2}{4}, \text{ Н}, \quad (6)$$

где E_o – модуль упругости первого рода для материала детали, Па.

Равновесие фрагмента детали имеет место при следующем равестве:

$$P_{pc} = P_{сж}, \quad (7)$$

откуда

$$\frac{E_s \cdot \pi \cdot d \cdot a}{b} \cdot [(t_n - t_k) \cdot b \cdot \alpha - \Delta] = \frac{\Delta}{b} \cdot E_o \cdot \frac{\pi \cdot (d-a)^2}{4}. \quad (8)$$

Решаем уравнение относительно Δ

$$\Delta = \frac{E_s \cdot d \cdot a \cdot (t_n - t_k) \cdot b \cdot \alpha}{\left(E_s \cdot d \cdot a + \frac{E_o \cdot (d-a)^2}{4} \right)}, \text{ м}. \quad (9)$$

Деформация одной шейки вала при наплавке проволоки Св-08Х13 ($\Delta = 0,01151$ мм) меньше, чем при наплавке проволоки У7 ($\Delta = 0,01365$ мм).

Как показывает полученная зависимость, определяющее влияние на деформацию, а следовательно и на остаточные напряжения, оказывает температура нагрева материала покрытия и ТКЛР. Меньшее влияние оказывает соотношение значений модуля упругости материалов покрытия и заготовки. Поэтому при выборе наплавочного материала следует отдавать предпочтение материалу с более низким значением ТКЛР, а нанесение покрытий вести с минимально возможной температурой. Расчеты показывают, что при наплавке десяти шеек вала уменьшение его длины составляет 0,8 мм, что соответствует данным инструментальных измерений. Имея деформации элементов детали и покрытия, их размеры и модули упругости, можно рассчитать напряжения в них вдоль оси детали.

Заключение. При выборе материала для восстановления стальных валов наплавкой, помимо его химического состава, необходимо учитывать и физико-механические свойства, которые оказывают влия-

ние на геометрические размеры восстанавливаемой детали, например, при неоднократной наплавке шеек коленчатого вала возможно уменьшение его длины до 3 мм.

Полученная теоретическая зависимость величины осевой деформации элементов стального коленчатого вала, возникающей при наплавке, от модуля упругости и температурного коэффициента линейного расширения материалов детали и покрытия, температуры нагрева материала покрытия и размеров наплавленных валиков позволяет прогнозировать изменение длины коленчатого вала после каждой наплавки и обоснованно ограничивать их количество.

Определяющее влияние на деформацию, а следовательно, и на остаточные напряжения оказывает температура нагрева материала покрытия и ТКЛР. В меньшей степени влияет соотношение значений модуля упругости материалов покрытия и заготовки. Поэтому при выборе наплавочного материала следует отдавать предпочтение материалу с более низким значением ТКЛР, а нанесение покрытий вести с минимально возможной температурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ярошевич, В.К. Коленчатые валы автомобильных двигателей / В.К. Ярошевич, М.А. Белоцерковский, Е.Л. Савич. – Минск: БНТУ, 2004. – 176 с.
2. Сидоров, А.И. Восстановление коленчатых валов тракторных двигателей плазменной наплавкой / А.И. Сидоров, К.А. Ильясов // Сварочное производство. – 1983. – № 4. – С. 38–40.
3. Бурумкулов, Ф.Х. Оценка триботехнических характеристик коленчатых валов, восстановленных установкой полуколец / Ф.Х. Бурумкулов, В.Е. Блох // Труды ГОСНИТИ / ГОСНИТИ. – М., 1992. – Т. 92: Восстановление деталей и техническое обслуживание машин, используемых в сельском хозяйстве. – С. 3–25.
4. Восстановление деталей машин: справочник / Ф.И. Пантелеенко [и др.], под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. – 672 с.
5. Лившиц, Л.С. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений / Л.С. Лившиц, А.Н. Хакимов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
6. Вигерина, Т.В. Влияние наплавки на длину коленчатого вала при восстановлении / Т.В. Вигерина // Вестник БНТУ. – 2011. – № 6. – С. 14–18.

Поступила 30.06.2014

THE CHOICE OF MATERIAL FOR THE RESTORATION OF GROSS SURFACING IN VIEW OF ITS PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

V. IVANOU, A. KASTRUK, T. VIGERINA

In the article the results of the analysis of the chemical composition of the materials used for the restoration of the shafts of medium carbon steel welding are presented. Theoretical dependence of the axial deformation of the weld shaft of the elastic modulus, the heating temperature and the temperature coefficient of linear expansion of the materials recovered products and coatings, bead size, on the basis of which it is possible to predict the change in the axial dimension of the shaft and limit the number of weld overlays are obtained. Decisive influence on the residual stresses have a heating temperature of the coating material and the temperature coefficient of linear expansion. To a lesser extent affected by the ratio values of the modulus of elasticity of the coating and the workpiece material.