

## ВЛИЯНИЕ НАПЛАВКИ НА ДЛИНУ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ

*Инж. ВИГЕРИНА Т. В.*

*Полоцкий государственный университет*

Одной из актуальных задач, стоящих перед предприятиями, эксплуатирующими автомобили и тракторы, является продление срока службы деталей, в том числе и стальных коленчатых валов – наиболее дорогостоящих деталей двигателей [1, 2]. Наплавка широко применяется при восстановлении валов, однако при этом возникают различные трудности, например уменьшение длины восстанавливаемого коленчатого вала. При наплавке процессам кристаллизации наплавленного материала предшествуют нагрев наплавляемого материала и материала основы сосредоточенным источником теплоты (дугой) и быстрое охлаждение расплавленного металла со скоростью охлаждения в десятки и сотни градусов в секунду. Часть теплоты из зоны сплавления наплавочного материала и материала восстанавливаемой детали отводится в глубь восстанавливаемой детали. При охлаждении наплавленного покрытия вдоль оси детали возникают остаточные растягивающие напряжения [3]. Напряжения появляются в результате неравномерно распределенного нагрева и различных температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) наплавляемого материала и материала восстанавливаемой детали. Один из способов уменьшения растягивающих напряжений – предварительный подогрев восстанавливаемой детали, который снижает скорость охлаждения наплавленного покрытия.

При необезличенном ремонте двигателей их коленчатые валы подвергаются наплавке до шести раз, что установлено по контрольным меткам, которые оставляют рабочие на щеках валов при каждом нанесении покрытия. Наплавка и напыление покрытий с использованием источников теплоты уменьшают длину

восстанавливаемого вала из-за неодновременного нагрева и охлаждения участков детали и покрытия. Это особенно характерно для наплавленных валов. Потому что по сравнению с напыленными валами их нагревают до большей температуры с расплавлением поверхностных слоев металла восстанавливаемых шеек. Среднее уменьшение длины, установленное по данным измерений групп валов с одинаковым числом наплавов из 15–20 единиц, показано на рис. 1.

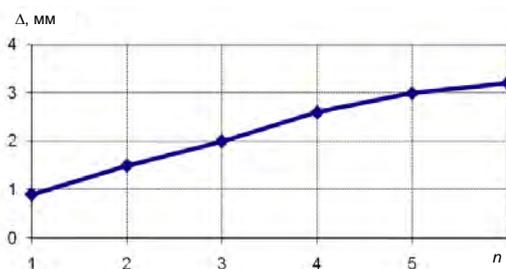


Рис. 1. Среднее уменьшение длины коленчатых валов  $\Delta$  в зависимости от числа наплавов  $n$

За счет возникновения внутренних напряжений в материале покрытия и детали длина коленчатых валов после четырех наплавов уменьшается примерно на 2,5 мм, а после пяти наплавов – на 3 мм. От восстановления к восстановлению детали наплавкой длина ее уменьшается. В практике ремонта наблюдались случаи, когда восстановленные коленчатые валы невозможно было установить в блоки цилиндров при сборке двигателей. Поэтому важно определить причины указанного явления и наметить мероприятия, которые исключают или уменьшают его. Некоторые предприятия для решения этой проблемы используют растяжение вала во время его наплавки.

Цель работы – обосновать мероприятия, уменьшающие осевую деформацию коленчатых валов при их восстановлении с использованием источника теплоты.

Наиболее современным и точным способом определения распределения температуры материала как на поверхности детали, так и в ее глубине является моделирование наплавочных процессов методом конечных элементов (МКЭ) на компьютере [4]. В работе математическое моделирование осуществлялось с использованием T-FLEX Анализа, все расчеты в данной программе велись с применением МКЭ. При этом между трехмерной моделью изделия и расчетной конечно-элементной моделью поддерживалась ассоциативная связь. Параметрические изменения исходной твердотельной модели автоматически переносились на сеточную конечно-элементную модель.

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

Цель тепловых расчетов сведена к определению распределения температуры материала, а также тепловых потоков в объеме изделия. При постановке задачи в T-FLEX Анализе задавался нестационарный процесс – расчет температурных полей осуществляли в функции времени. В анализируемой физической системе происходило изменение распределения температурных полей с течением времени, и в результате расчета мы получали поля температур в каждый момент времени некоторого заранее определенного временного интервала. При подготовке задачи задавали геометрические параметры моделируемой системы и строили конечно-элементную сетку, аппроксимирующую геометрию конструкции.

Теплота при наплавке вводится в изделие через некоторый участок поверхности – катодное пятно нагрева. В нашем случае источником теплоты является сварочная дуга – этот источник теплоты считается поверхностным, сила

тока  $I = 175$  А, напряжение  $U = 30$  В, время наплавки одного валика  $t = 40$  с.

Эффективная тепловая мощность  $q$  электрической дуги [3]

$$q = \eta UI = 0,9 \cdot 30 \cdot 175 = 4725 \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $\eta = 0,9$  – эффективный КПД нагрева для дуговой наплавки.

Непрерывно движущийся источник теплоты постоянной мощности перемещается по поверхности восстанавливаемого тела равномерно со скоростью

$$v = \frac{\pi dn}{60} = \frac{\pi \cdot 0,052 \cdot 1,5}{60} = 0,004 \text{ м/с}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр наплавляемой шейки вала, м;  $n$  – частота вращения наплавляемого вала, мин<sup>-1</sup>.

В неподвижной системе координат температурное поле точечного подвижного непрерывно действующего источника постоянной мощности, перемещающегося по поверхности тела с постоянной скоростью, определяется по формуле [5]

$$T(x_0, y_0, z_0, t) = T_n + \int_0^t \frac{2q}{c_p \sqrt{[4\pi a(t-t')]^3}} \times \exp\left(-\frac{(x_0 - vt')^2 + y_0^2 + z_0^2}{4a(t-t')}\right) dt', \quad (3)$$

где  $T(x_0, y_0, z_0, t)$  – температура материала на его поверхности, в точке с координатами  $x_0, y_0, z_0$ , К;  $t$  – текущее время, с;  $t'$  – время распространения теплоты, с;  $v$  – скорость движения источника теплоты относительно восстанавливаемой детали, м/с;  $q$  – эффективная тепловая мощность электрической дуги, Вт;  $c_p$  – объемная теплоемкость, Дж/(м<sup>3</sup>·К);  $a$  – коэффициент температуропроводности материала,  $a = \frac{\lambda}{c_p}$ , м<sup>2</sup>/с;

$\lambda$  – теплопроводность материала, Вт/(м·К);  $T_n$  – начальная температура материала, К.

Программа разбивает анализируемую конструкцию на множество конечных элементов, и для каждого из них производится расчет в соответствии с приведенным выше уравнением

ем. В результате проведенных расчетов мы получили графическое изображение температуры материала на его поверхности при наплавке (рис. 2). Максимального значения (1773 К) температура достигает на поверхности наплавляемого материала. Материал детали нагревается в интервале 463–1116 К. Диаметры восстанавливаемых валов лежат в интервале 50–70 мм, что способствует увеличению скорости охлаждения, повышает вероятность возникновения закалочных структур. Температура нагрева материала вдоль оси  $x$  падает быстрее, чем вдоль оси  $y$ , что в комплексе способствует увеличению остаточных напряжений.

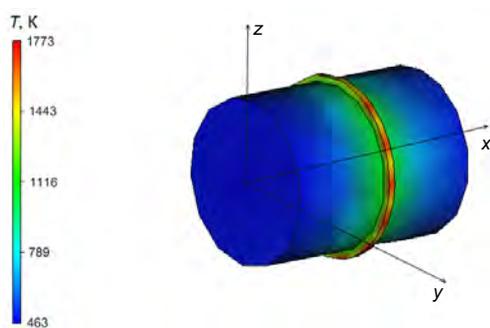


Рис. 2. Распределение температурного поля при наплавке

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, имеющее металлическую связь с металлом заготовки;
- сечение валика представляет собой эллипс с осями  $a$  и  $b$  (м);
- остаточные 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;
- коэффициент Пуассона  $\mu$  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).

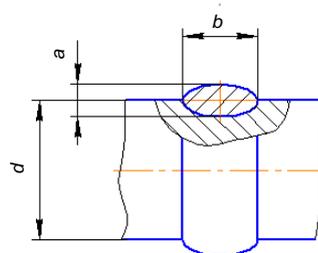


Рис. 3. Схема шейки детали с наплавленным валиком материала

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), которые в отдельные моменты времени равны друг другу.

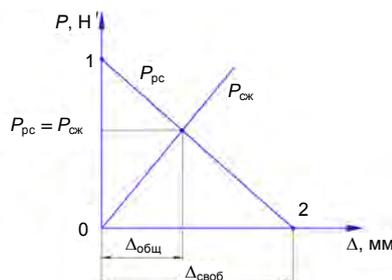


Рис. 4. Графики силы  $P_{рс}$ , растягивающей покрытие, и силы  $P_{сж}$ , сжимающей основной материал детали, в зависимости от деформации  $\Delta$

Деформация материала валика  $\Delta_{своб}$  (м) вдоль оси детали (уменьшение ширины валика  $b$ ) при охлаждении в отсутствие сопротивления со стороны материала детали

$$\Delta_{своб} = b(t_n - t_k)\alpha, \text{ мм}, \quad (4)$$

где  $t_n$ ,  $t_k$  – температура нагрева материала покрытия и комнатная температура соответственно, °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения, 1/К.

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

$$\sigma_p = \frac{\Delta_{\text{своб}}}{b} E_B, \text{ Па}, \quad (5)$$

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

Сила  $P_{\text{pc}}$ , растягивающая наплавленные валики покрытия вдоль оси детали до достижения деформации  $\Delta_{\text{своб}}$  (рис. 5), может быть найдена интегрированием правой части уравнения

$$\begin{aligned} P_{\text{pc}} &= \int_0^{2\pi} \frac{\Delta_{\text{своб}}}{b} E_B \frac{d}{2} a d\varphi = \frac{a}{b} \Delta_{\text{своб}} E_B \frac{d}{2} \int_0^{2\pi} d\varphi = \\ &= \pi \frac{a}{b} \Delta_{\text{своб}} E_B d = \pi a d \sigma_p. \end{aligned} \quad (6)$$

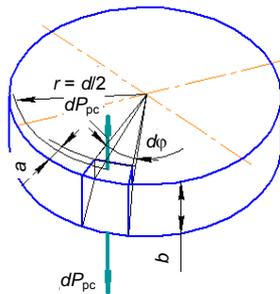


Рис. 5. Часть детали толщиной  $b$  с элементом наплавляемого валика покрытия

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

- координаты точки 1:  $\left[ 0; (t_n - t_k) \alpha E \pi d a \right]$ ;
- координаты точки 2:  $\left[ \Delta_{\text{своб}}; 0 \right]$ ;
- уравнение прямой

$$\frac{\Delta - 0}{\Delta_{\text{своб}} - 0} = \frac{P_{\text{pc}} - (t_n - t_k) \alpha E \pi d a}{0 - (t_n - t_k) \alpha E \pi d a}. \quad (7)$$

Откуда

$$\begin{aligned} P_{\text{pc}} &= \frac{(t_n - t_k) \alpha E_B \pi d a - \Delta E_B \pi d a}{b} = \\ &= \frac{E_B \pi d a}{b} \left[ (t_n - t_k) b \alpha - \Delta \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Сила  $P_{\text{сж}}$  зависит от деформации  $\Delta$  следующим образом:

$$P_{\text{сж}} = \frac{\Delta}{b} E_d \frac{\pi (d - a)^2}{4}, \text{ Н}, \quad (9)$$

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

Равновесие фрагмента детали имеет место при

$$P_{\text{pc}} = P_{\text{сж}},$$

откуда

$$\frac{E_B \pi d a}{b} \left[ (t_n - t_k) b \alpha - \Delta \right] = \frac{\Delta}{b} E_d \frac{\pi (d - a)^2}{4}.$$

Решаем уравнение относительно  $\Delta$

$$\Delta = \frac{E_B d a (t_n - t_k) b \alpha}{E_B d a + \frac{E_d (d - a)^2}{4}}, \text{ м}. \quad (10)$$

Из результатов измерений наплавленного валика следует:  $a = 1,7$  мм;  $b = 8$  мм. Деформация при наплавке проволокой Св-08Х13  $\Delta_1 = 0,01151$  мм меньше, чем при наплавке проволоки У7  $\Delta_2 = 0,01365$  мм. Расчеты показывают, что при наплавке десяти шеек вала уменьшение его длины [составляет 0,8 мм, что соответствует данным инструментальных измерений.

Полученная зависимость свидетельствует, что определяющее влияние на величину деформации, а следовательно, на величину остаточных напряжений 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 нагрева его материала. Имея деформации элементов детали и покрытия, их размеры и модули упругости, расчетные напряжения вдоль оси детали в них составляют:

- в покрытии (растягивающие)

$$\sigma_{pc} = \frac{\Delta}{b} E_b = \frac{0,01151}{8} \cdot 2,17 \cdot 10^5 = 312 \text{ МПа};$$

- в материале детали (сжимающие)

$$\begin{aligned} \sigma_{сж} &= 4\sigma_{pc} \frac{ad}{(d-a)^2} = \\ &= 4 \cdot 312 \cdot \frac{1,7 \cdot 52}{(52-1,7)^2} = 43,6 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

При работе детали эти напряжения, вероятно, уменьшаются за счет нагрева и вибраций.

### ВЫВОД

Установлено, что при восстановлении коленчатого вала наплавкой проволокой Св-08Х13 осевая деформация наплавленного элемента детали  $\Delta_1 = 0,01151$  мм, при наплавке проволокой У7  $\Delta_2 = 0,01365$  мм. При восстановлении десяти шеек вала уменьшение его длины составляет 0,8 мм, что подтверждается данными инструментальных измерений, следовательно, полученная зависимость осевой деформации наплавленного элемента детали от модуля упругости, температуры нагрева и температурного коэффициента линейного расширения материалов детали и покрытия, размеров наноси-

мого валика материала верна и позволяет прогнозировать растягивающие напряжения в покрытии. На основании изложенного желательным числом восстановлений детали свести к одному разу и проводить следующие ресурсосберегающие мероприятия: использование всех ремонтных размеров детали, предусмотренных конструкторской документацией; обеспечение комплектующими деталями (вкладышами коленчатого вала) соответствующих размеров; правкой детали перед обработкой резанием.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Черноиванов, В. И. Организация и технология восстановления деталей машин / В. И. Черноиванов, В. П. Лялякин. – М.: ГОСНИТИ, 2003. – 488 с.
2. Иванов, В. П. Ремонт машин. Технология, оборудование, организация: учеб. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. П. Иванов. – Новополоцк: ПГУ, 2006. – 448 с.
3. Латыпов, Р. А. Снижение остаточных напряжений в покрытии при восстановлении деталей электроконтактной приваркой / Р. А. Латыпов, П. И. Бурак, Д. В. Дубровин // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2005. – № 1. – С. 20–22.
4. T-FLEX Анализ: пособие по работе с системой / АО «Топ Системы». – М.: АО «Топ Системы», 2009. – 146 с.
5. Теория сварочных процессов: учеб. для вузов / А. В. Коновалов [и др.]; под общ. ред. В. М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 752 с.

Поступила 09.03.2011