

## МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 621.693

### ВОССТАНОВЛЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

канд. техн. наук, доц. А.П. КАСТРЮК;  
канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН; канд. техн. наук Т.В. ВИГЕРИНА  
(Полоцкий государственный университет)

*Представлены теоретические исследования, в ходе которых получены зависимости величины осевой деформации элементов восстанавливаемой детали от модуля упругости, температуры нагрева и температурного коэффициента линейного расширения материала восстанавливаемого изделия и материала, используемого для их восстановления. Полученные зависимости позволяют прогнозировать растягивающие напряжения в наносимом материале, также появляется возможность определить укорочение вала в случае его восстановления наплавкой и величину ширины трещины, которую в состоянии стянуть сварной шов, наносимый выбранным материалом. Предложенный способ заварки трещин поперечными швами имеет явные преимущества перед другими способами: исключает подогрев заготовки, разделку, засверливание концов трещин и последующую механическую обработку швов; обеспечивает наибольшую герметичность; стягивает трещину за счет повышенной продольной усадки сварных швов; придает стойкость против образования холодных и горячих трещин.*

**Введение.** Восстановление прочности изнашиваемых элементов деталей за счет восстановления размеров поперечных сечений производится автоматически при нанесении покрытий.

Основные работы по восстановлению прочности включают устранение пробоин и трещин. Устранение пробоин – установка стальных накладок с закреплением их полимерными композициями или сваркой. Основные способы устранения трещин: нанесение на поверхность детали полимерного покрытия; стягивание фигурными вставками; сварка. Полимерные покрытия на основе эпоксидной смолы применяют для устранения трещин любых размеров. Однако под действием вибраций и тепла с конденсацией воды такие покрытия недолговечны. Вода попадает под края покрытия, которое постепенно отслаивается, а стенки изделия подвергаются глубокой коррозии. Стяжки (фигурные вставки) не позволяют устранять раскрытые трещины с зазором более 0,3 мм и не обеспечивают герметичность стыка. Основной объем работ по восстановлению как статической прочности корпусных деталей, так и герметичности их стенок приходится на сварку.

Нами предложен процесс сварки трещин стальными электродами ЦЧ-4 из проволоки Св-08 или Св-08А диаметром 3...4 мм с толстым фтористо-кальциевым покрытием. Покрытие включает титан или ванадий, содержание которых в наплавленном металле доходит до 9,5 %. Сварку ведут на постоянном токе силой 120...150 А обратной полярности при напряжении 20 В. Перед сваркой рекомендуется трещину разделить на глубину 2/3, заготовку подогреть до температуры 150...200 °С, а после наплавки валиков их сразу же проковать. Поскольку герметичность стенок восстанавливалась не всегда, сварной шов паяли припоями ПОС-30 или ПОС-40.

Лучшие результаты дает применение самозащитной проволоки ПАНЧ-11 диаметром 1,2 мм состава (% масс.): никель 80, медь 2...3, марганец 1...4, редкоземельные элементы 0,1...0,5, железо – остальное (ТУ 48-2-593-77). Стенки детали зачищают до блеска и разделяют на глубину 3...5 мм, вылет электрода составляет 10...20 мм. Используют полуавтомат ПДГ-305У3. Сварку вели прерывистыми валиками длиной 30...50 мм. После каждого перехода валику давали остыть до температуры 40 °С и обрабатывали металлической щеткой. Однако наблюдались холодные трещины вдоль шва в зоне термического влияния.

При ступенчатом снижении напряжения до 22, 29 и 18 В число сварочных трещин резко снижалось. При достижении напряжения до 14...16 В трещины не возникали, однако глубина проплавления увеличивалась и составляла 2 мм. Дальнейшее понижение напряжения дуги было недопустимым. Изменение полярности с прямой на обратную повысило выделение тепла на электроде, снизило нагрев заготовки и обеспечило герметичность шва. Это подтверждено и экспериментальными исследованиями ГосНИТИ при сварке конструкций машин сельскохозяйственного назначения.

В последние годы на примере восстановления нижних перемычек между цилиндрами на ряде заводов апробирована сварка трещин поперечными валиками проволокой ПАНЧ-11. Усталостная проч-

ность перемычек стала выше, чем у новых. Практика подтверждает возможность устранения других трещин. Нецелесообразно устранять трещины крышек коренных подшипников.

Предложен следующий процесс устранения трещин на стенках водяной рубашки чугунных блоков цилиндров. Трещину кернят по ее линии через 15...20 мм, поскольку после зачистке она становится невидимой. Зачищают поверхность вокруг трещины до металлического блеска и снова кернят, чтобы линия была видна при сварке. Вместо кернения края трещины можно заглубить на 1,0...1,5 мм в тело детали. Трещину не разделяют, а ее концы не засверливают.

Для смыкания раскрытых трещин необходимо свариваемый элемент сжать одной или несколькими накладными струбцинами. Это способствует восстановлению формы отверстий, на которые выходят трещины. При сварке трещины, возникшей в одной средней перемычке блока цилиндров двигателя Д-240, она закрывается практически полностью. При одновременной сварке сквозных трещин в трех перемычках наблюдается их стягивание до 0,17 мм, крайних перемычек до 0,10 мм. Следовательно, при сварке перемычек полного закрытия трещин за счет стягивания их сварным швом не происходит, а значит, герметизация перемычек не восстанавливается. Использование скоб устраняет это явление (до 0,03...0,08 мм).

Сварку ведут швами не вдоль, как обычно, а перпендикулярно трещине швами длиной 15...20 мм с перекрытием на одну треть их ширины. После наложения каждого шва ожидают остывания материала примерно до 40 °С. Концы трещины заваривают на 10...15 мм дальше видимой зоны ее распространения. Если трещина расположена в средней части детали, заваривают начиная со середины, и далее продолжают заварку попеременно в одну и другую сторону. Если трещина расположена у торца детали, ее заварку начинают с того конца, который наиболее удален от торца, затем продолжают попеременно в одну и другую стороны – от середины и от концов. После наложения швов на середине и концах трещины последующие швы равномерно распределяют по всей длине трещины. Укорачивающиеся швы при охлаждении плотно смыкают поверхности трещины.

При заварке длинных трещин используют обратноступенчатый способ. При этом трещину разбивают на участки длиной 100...150 мм. Шов на каждом участке наплавляют в направлении, обратном общему направлению сварки. Резкое уменьшение деформации при обратноступенчатом способе объясняется тем, что из двух соседних участков деформации имеют противоположное направление и вызывают в сварном шве незначительные волнистые искривления. Уменьшению деформаций способствуют равномерный нагрев сварного шва и перерывы в процессе сварки.

Таким образом, основной объем работ по восстановлению статической прочности корпусных деталей, как и герметичности их стенок, приходится на сварку, которая также сопровождается большими тепловложениями и укорочением длины сварного шва [1; 2].

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 предшествуют 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. Длина коленчатых валов после нескольких наплавков 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.

Цель данного исследования – получить зависимости, позволяющие учитывать теплофизические и механические свойства материала восстанавливаемых деталей и материала, используемого при восстановлении, для прогнозирования их поведения и внесения необходимых изменений в процесс восстановления.

**Методики и оборудование.** В качестве наплавочных материалов использовались проволоки ПП-Нп-80Х20Р3Т, Св-08Х13 с различным содержанием углерода и легирующих элементов. Для наплавки образцов использовали установку, созданную на базе списанного станка модели 16К20. Защитные газы подавали из двух баллонов в смеситель, необходимое процентное соотношение газов регулировали изменением давления на их входе в смеситель.

**Результаты и обсуждения.** Для расчета деформаций в материале восстанавливаемой детали и валике наплавленного металла и внутренних напряжений 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 детали 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  $\mu$  в расчетах не учитывается.

С учетом условия, что материал валика в направлении оси детали будет растянут под действием силы  $P_{pc} = \pi a d (t_n - t_k) \alpha E_\sigma$ , а материал шейки детали под валиком сжат под действием силы

$P_{сж} = \frac{\Delta}{b} \cdot E_\sigma \cdot \frac{\pi (d - a)^2}{4}$  (рис. 1), была составлена система уравнений, решение которой позволило рассчитать осевую деформацию  $\Delta$  (рис. 2):

$$\Delta = \frac{E_\sigma a b d \alpha (t_n - t_k)}{\left( E_\sigma a d + \frac{E_\sigma (d - a)^2}{4} \right)}, \text{ м}, \quad (1)$$

где  $E_\sigma, E_\delta$  – модули упругости первого рода для материала валика и детали, Па;  $a$  и  $b$  – меньшая и большая оси эллипса сечения наплавляемого валика, м;  $d$  – диаметр наплавляемого вала, м;  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения, 1/К;  $t_n$  и  $t_k$  – соответственно температура нагрева материала покрытия и комнатная температура, К.

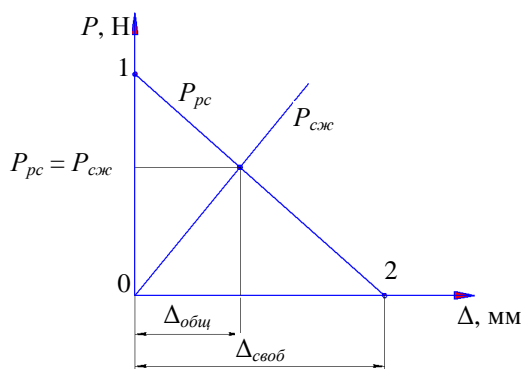


Рис. 1. Графики силы  $P_{pc}$ , растягивающей покрытие, и силы  $P_{сж}$ , сжимающей основной материал детали, в зависимости от деформации  $\Delta$

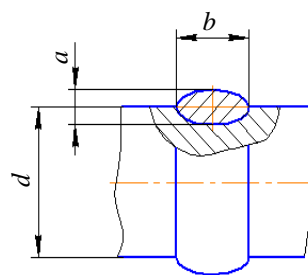


Рис. 2. Схема шейки детали с наплавленным валиком материала

Расчетная осевая деформация при наплавке одного валика покрытия проволокой Св-08Х13, равная 0,01151 мм, меньше аналогичного показателя при наплавке проволокой У7, равного 0,01365 мм. Определяющее влияние на деформацию, а следовательно и на остаточные напряжения, оказывает температура нагрева материала покрытия и температурный коэффициент линейного расширения. Меньшее влияние оказывает соотношение значений модуля упругости материалов покрытия и заготовки [3].

Следовательно, при выборе наплавочного материала следует отдавать предпочтение материалу с более низким значением температурного коэффициента линейного расширения, нанесение покрытий вести с минимально возможным нагревом материала, а число наплавочных шеек коленчатых валов ограничить двумя в течение срока их службы.

При восстановлении прочности корпусных деталей для смыкания раскрытых трещин необходимо свариваемый элемент сжать одной или несколькими накладными струбцинами. Это способствует восстановлению формы отверстий, на которые выходят трещины. При сварке трещины, возникшей в одной средней перемычке блока цилиндров двигателя Д-240, она закрывается практически полностью. При одновременной сварке сквозных трещин в трех перемычках наблюдается их стягивание до 0,17 мм, крайних перемычек до 0,10 мм. Следовательно, при сварке перемычек полного закрытия трещин за счет стягивания их сварным швом не происходит, а значит, герметизация перемычек не восстанавливается. Использование скоб устраняет явление (до 0,03...0,08 мм). В силу значительных стягивающих напряжений и невысокой склонности к образованию околошовных трещин наиболее приемлемой с точки зрения герметичности является сварка со швами поперек трещины (рис. 3).

Укорочение сварного шва  $\Delta l_{ш}$  при свободном охлаждении, если температура металла изменяется от температуры его плавления до комнатной (точка 2 на графике, рис. 4):

$$\Delta l_{ш} = \alpha l_{ш} (T_{пл} - T_0), \text{ м}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения материала сварного шва, 1/К;  $l_{ш}$  – длина сварного, м;  $T_{пл}$  и  $T_0$  – соответственно температура плавления материала сварного шва и температура комнатная, К.

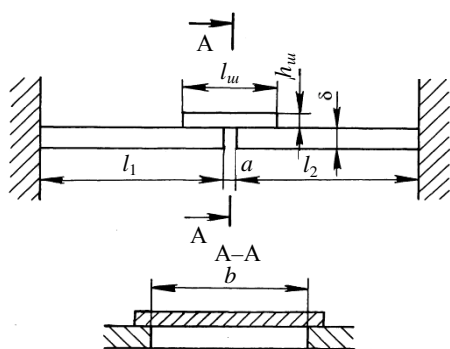


Рис. 3. Схема сварного соединения при устранении трещины

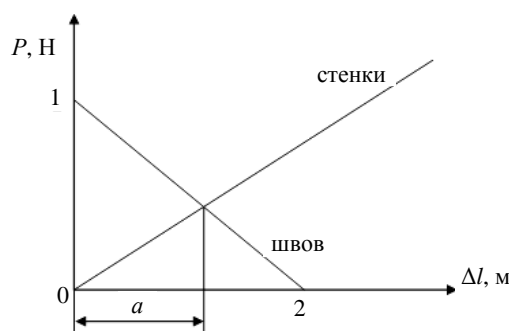


Рис. 4. Графики зависимости усилий  $P$  в сварном шве и стенках детали от деформации  $\Delta l$

Если не позволить сокращение длины сварного шва сопротивлением стенок детали, сила его растяжения  $P$ , отнесенная к единице ширины (точка 1 на графике, рис. 4), равна

$$P = \frac{\alpha l_{ш} (T_{пл} - T_0) E_{ш} h_{ш}}{l_{ш}} = \alpha (T_{пл} - T_0) E_{ш} h_{ш}, \text{ Н/м}, \quad (3)$$

где  $E_{ш}$  – модуль нормальной упругости материала сварного шва, МПа;  $h_{ш}$  – высота сечения сварного шва, м.

Сила (на рисунке 4 график силы проходит через начало координат), отнесенная к единице ширины сварного шва, необходимая для стягивания стенок детали и закрытия трещины шириной  $\Delta l$ , равна

$$P = \frac{E_0 \Delta l \delta}{l_1 + l_2}, \text{ Н/м}, \quad (4)$$

где  $E_0$  – модуль нормальной упругости материала детали, МПа;  $\delta$  – толщина стенки детали, м;  $l_1$  и  $l_2$  – длина стягиваемых участков стенки, м.

Уравнение прямой (рис. 4), проходящей через точки 1 и 2, имеет следующий вид:

$$\frac{\Delta l - 0}{l_{ш} \alpha (T_{пл} - T_0) - 0} = \frac{P - \alpha (T_{пл} - T_0) E_{ш} h_{ш}}{0 - \alpha (T_{пл} - T_0) E_{ш} h_{ш}},$$

откуда

$$P = - \frac{\Delta l \cdot E_{ш} h_{ш} - l_{ш} \alpha (T_{пл} - T_0) E_{ш} h_{ш}}{l_{ш}}. \quad (5)$$

Сравнивая уравнения (4) и (5), находим равновесную деформацию  $\Delta l$ :

$$\Delta l = \frac{\alpha(T_m - T_0)E_u h_u l_u (l_1 + l_2)}{E_u h_u (l_1 + l_2) + E_o \delta l_u}. \quad (6)$$

Расчеты показывают, что если края стенки толщиной 10 мм с трещиной защемлены, а длина сварных швов высотой 4 мм равна 20 мм, то эти швы стягивают трещину шириной до 0,04 мм. Для получения надежных результатов необходимо стенки с трещинами перед их сваркой стягивать резьбовыми трубцинами [4].

Таким образом, предложенный способ заварки трещин поперечными швами дает такие преимущества, как исключение подогрева заготовки, разделки, засверливания концов трещин и последующей механической обработки швов, обеспечивает наибольшую герметичность (по сравнению с ранее применяемыми способами) без проковки и нанесения покрытий; стягивает трещину за счет повышенной продольной усадки сварных швов; придает стойкость против образования холодных и горячих трещин; создает условия для разрушения оксидной пленки с поверхности сварочной ванны движущимися положительными ионами; обеспечивает возможность заварки слабых стенок с двух сторон; допускает 2...4-кратную заварку трещин слабых стенок в одном и том же месте (с предварительной зачисткой сварного шва); обеспечивает получение соединений, равнопрочных с материалом заготовки; допускают устранение трещин длиной до 1,5 м, что в 6 раз превышает установленную их длину нормативными документами.

**Выводы.** Полученные зависимости величины деформации, возникающей при восстановлении деталей типа «вал» и заварке трещин в корпусных деталях, от модуля упругости, температуры нагрева и температурного коэффициента линейного расширения материалов детали и покрытия, размеров наносимого валика материала позволяют прогнозировать растягивающие напряжения в наносимом материале. Также появляется возможность определить укорочение вала в случае его восстановления наплавкой и величину ширины трещины, которую в состоянии стянуть сварной шов, наносимый выбранным материалом. Использование полученных зависимостей позволяет вносить необходимые изменения в технологический процесс восстановления деталей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кастрюк, А.П. Устранение сваркой трещин в корпусных деталях / А.П. Кастрюк // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: тез. науч.-практ. семинара, Минск, 10–13 апр. 2012 г.). – Минск: БНТУ. – 2012. – С. 104–105.
2. Иванов, В.П. Ремонт машин. Технология, оборудование, организация: учебник / В.П. Иванов. – 2-е изд. перераб. и доп. – Новополоцк: УО «ПГУ», 2006. – 448 с.
3. Вигерина, Т.В. Влияние наплавки на длину коленчатого вала при восстановлении / Т.В. Вигерина // Вестн. БНТУ. – 2011. – № 6. – С. 14–18.
4. Кастрюк, А.П. Ресурсосбережение и качество ремонта агрегатов машин с восстановлением их деталей: науч. изд. / А.П. Кастрюк, Т.В. Вигерина. – Новополоцк: ПГУ, 2012. – 199 с.

Поступила 20.01.2015

#### RESTORATION OF DETAILS OF CARS TAKING INTO ACCOUNT INFLUENCE OF HEATPHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS

A. KASTRUK, A. DUDAN, T. VIGERINA

*In work theoretical researches during which dependences of size of axial deformation of elements of the restored detail on the module of elasticity, temperatures of heating and temperature coefficient of linear expansion of material of the restored product and the material used for their restoration are received are conducted. The received dependences allow to predict the stretching tension in the applied material. Also there is an opportunity to determine shortening of a shaft in case of its restoration by a overlaying and the size of width of a crack which is able to pull together the welded seam put with the chosen material. The offered way of tea leaves of cracks cross seams gives such advantages as an exception of heating of preparation, cutting, spotting of the ends of cracks and the subsequent machining of seams, provides the greatest tightness, pulls together a crack due to the increased longitudinal shrinkage of welded seams; gives firmness against formation of cold and hot cracks.*