



ВЛИЯНИЕ ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ НА ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В НАПЛАВЛЕННЫХ ВАЛАХ

Академик НАН Украины **В. И. МАХНЕНКО**, **В. М. ШЕКЕРА**, канд. техн. наук
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
Т. Г. КРАВЦОВ, д-р техн. наук (Мариупол. факультет Одес. гос. морской академии),
В. В. СЕВРЮКОВ, инж. (М-во транспорта Украины)

Выполнены экспериментальные исследования остаточных напряжений, возникающих в наплавленных валах и влияющих на их сопротивляемость циклическим нагрузкам. Показано, что последующая механическая обработка валов (обкатка роликом, ультразвуковая ударная обработка, обработка взрывом) способствует созданию в поверхностном слое сжимающих напряжений.

Ключевые слова: наплавка, модель вала, остаточные напряжения, обкатка роликом, ультразвуковая обработка, расчет, эксперимент

Наплавка является одним из эффективных методов восстановления поверхностей деталей и придания им определенных функциональных свойств. На водном транспорте наплавка успешно применяется для придания поверхностям, например, деталям типа валов различных механизмов и устройств, коррозионной стойкости, например, в морской воде. Однако во многих случаях качество наплавленного вала определяется не только коррозионной стойкостью поверхности, но и в значительной степени сопротивляемостью циклическим нагрузкам. Этот вопрос достаточно подробно освещен в литературе [1, 2 и др.], и нет необходимости подробно на нем останавливаться. Отметим только, что сопротивляемость циклическим нагрузкам наплавленного вала существенно зависит от возникающих при наплавке геометрических и физических неоднородностей, обусловленных соответствующими микро- и макро-несплошностями, дефектами микроструктуры и остаточными напряжениями. Поэтому задача технологии наплавки состоит в снижении степени проявления указанных факторов путем выбора рациональных режимов и условий наплавки и последующей обработки наплавленной детали. Последнее в ряде случаев может способствовать существенному повышению сопротивления усталости за счет перераспределения остаточных напряжений и изменения свойств материала наплавленного изделия.

Различают два вида последующей обработки наплавленных валов: термическую и механическую. Оба преследуют цель улучшения микроструктуры и получения благоприятного распределения остаточных напряжений, что в итоге должно привести к повышению сопротивления усталости. Высокий отпуск — наиболее известный вид последующей термической обработки. Он способствует существенной релаксации остаточных напряжений после

наплавки и в определенной степени улучшению микроструктур в металле зоны термического влияния при довольно жестких температурных режимах наплавки, обуславливающих возникновение закалочных микроструктур. С этих позиций высокий отпуск, несомненно, является достаточно эффективной операцией для повышения сопротивления усталости стальных валов из ферритно-перлитной стали, когда наплавленный слой по свойствам аналогичен основному металлу, что характерно при восстановительной наплавке.

При наплавке коррозионнозащитного слоя из аустенитной стали разнородность свойств основного и наплавленного металла приводит к образованию после высокого отпуска новых остаточных напряжений. При этом в наплавленном слое вблизи зоны сплавления могут возникать достаточно высокие растягивающие напряжения, т. е. с точки зрения снижения остаточных напряжений термообработка наплавленного вала малоэффективна. Кроме того, следует учитывать, что выдержка наплавленного вала при температурах высокого отпуска заметно активизирует вблизи зоны сплавления процессы карбидообразования и охрупчивания материала, что при наличии инициаторов усталостных трещин может существенно уменьшить сопротивление усталости. Это является одной из основных причин широкого интереса разработчиков к различным методам механической обработки наплавленного вала, в первую очередь, с целью получения более благоприятного распределения остаточных напряжений, а также одновременного упрочнения за счет наклепа поверхностного слоя, где иницируются усталостные трещины.

Среди способов механической обработки наиболее известны следующие: обкатка роликом [3, 4 и др.], обработка взрывом [5 и др.] и ультразвуковая ударная обработка (УУО) [6–8 и др.]. К сожалению, в литературе отсутствуют результаты сравнительных исследований, на основе которых можно говорить о преимуществе того или иного способа механической обработки применительно к валам,

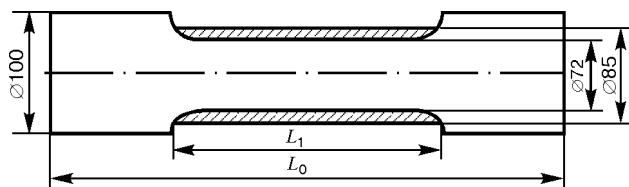


Рис. 1. Схема наплавки модели вала, используемого для усталостных испытаний

наплавленным защитным коррозионностойким слоем, из аустенитной стали. В данной работе была поставлена задача внести ясность по указанному вопросу. С этой целью был выполнен комплекс исследований по распределению остаточных напряжений в модели вала из углеродистой стали 35, наплавленного дуговой сваркой в углекислом газе проволокой Св-05Х20Н9ФБС (рис. 1) по спирали малого шага. На наплавляемый участок диаметром 72 мм наносили слой наплавки 7... 8 мм за несколько проходов. Затем наплавленную поверхность обрабатывали точением до диаметра 85 мм, что соответствует размерам испытываемой на усталость модели вала без механической обработки. В полученном таким образом образце (вариант № 1 из таблицы) исследовали распределение остаточных напряжений. По сравнению с ним оценивали вклад в распределение остаточных напряжений различных видов механической обработки, которой подвергались другие образцы таких же размеров (таблица). Для измерения остаточных напряжений использовали метод Закса [1]: из модели вала вырезали поперек вала диски толщиной 5... 10 мм, в которых определяли остаточные радиальные σ_{rr}^I и окружные $\sigma_{\theta\theta}^I$ напряжения. Поскольку при вырезке дисков происходит полная релаксация осевых остаточных напряжений σ_{zz} , то это в определенной степени должно сказаться и на отличии измеряемых напряжений в диске σ_{rr}^I и $\sigma_{\theta\theta}^I$ от таковых в валу до разрезки его на диски.

Степень такого отличия оценивали расчетным путем на основе численного моделирования термомеханических процессов при наплавке модели вала [9]. На рис. 2 приведены расчетные данные по распределению остаточных напряжений $\sigma_{\theta\theta}$ и σ_{zz} в раз-

Варианты механической обработки модели вала из стали 35, наплавленного проволокой Св-05Х20Н9ФБС

№ варианта	Индекс образца	Способ обработки
1	XV	Без механической обработки
2	I	Обкатка роликом
3	XII	»»
4	VIII	»»
5	XVIII	Обработка взрывом
6	XVII	»»
7	XX	УУО инструментом после некоторого срока эксплуатации
8	XI	То же
9	XXI	»»
10	XVI	УУО с предварительным нагревом до 400 °С
11	XXII	»»

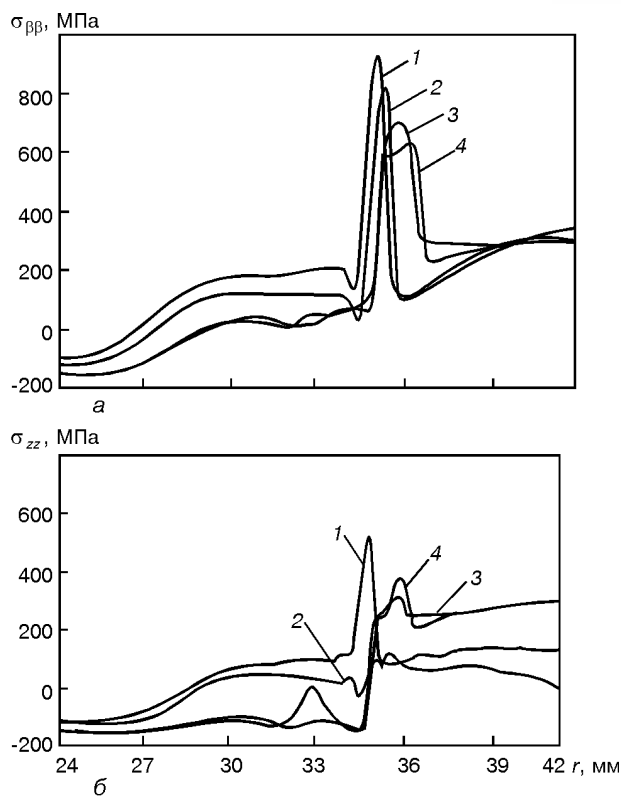


Рис. 2. Распределение расчетных остаточных напряжений $\sigma_{\theta\theta}$ (а) и σ_{zz} (б) в зоне наплавки модели вала из стали 35: сечения 1, 2 соответствуют началу, 3, 4 — середине наплавки; 1, 3 — по оси вала; 2, 4 — в зоне сочетания смежных валиков

личных сечениях модели вала по длине наплавки слоем толщиной 6 мм за четыре прохода. На рис. 3, б показано распределение расчетных напряжений $\sigma_{\theta\theta}^I$ и σ_{rr}^I в диске, соответствующее операции вырезки диска из вала, т. е. когда для торцевых кромок диска в сечениях 2, 4 (рис. 2) заданы условия $\sigma_{zz} = \sigma_{rz} = 0$. Сравнивая данные на рис. 3, б относительно $\sigma_{\theta\theta}^I$ (кривая 1) с данными на рис. 2, а (кривые 2, 4) видим, что вырезка диска сравнительно мало изменяет значение и характер распределения окружных напряжений $\sigma_{\theta\theta}$, хотя при этом существенно изменяются напряжения σ_{zz} (если сравнить данные на рис. 2, б с $\sigma_{zz}^I \equiv 0$). Тем не менее следует считаться с тем, что в наплавленном слое остаточные напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ находятся на уровне 300 МПа для вала, а для диска $\sigma_{\theta\theta}^I \approx 200$ МПа. Пиковые значения этих напряжений в зоне сплавления изменяются от 650 МПа в валу до ≈ 520 МПа в диске. Значительно меньшее отличие имеет место для остаточных напряжений σ_{rr} , поскольку они малы по сравнению с $\sigma_{\theta\theta}$ и σ_{zz} .

Таким образом, измерения остаточных напряжений в дисках, вырезанных из наплавленного вала, дают достаточно достоверную картину распределения и приближенную об уровне остаточных напряжений $\sigma_{\theta\theta}$ и σ_{rr} в соответствующих сечениях вала, что вполне приемлемо при сравнительных оценках степени влияния соответствующей механической обработки наплавленного вала на остаточные напряжения. Тем более, что трудно указать более надежный экспериментальный метод для таких целей, за исключением, возможно, метода нейтронной [10]

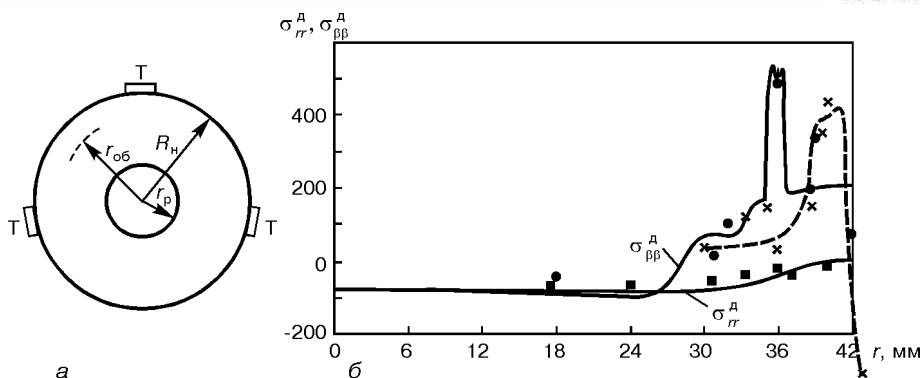


Рис. 3. Схема расточки диска с тензодатчиками (а) и распределение в нем остаточных напряжений $\sigma_{\beta\beta}^d$ и σ_{rr}^d по данным расчета (сплошные линии) и эксперимента (● — $\sigma_{\beta\beta}^d$; ■ — σ_{rr}^d) без обработки, а также экспериментальных данных для $\sigma_{\beta\beta}^d$ после УУО (X) (б)

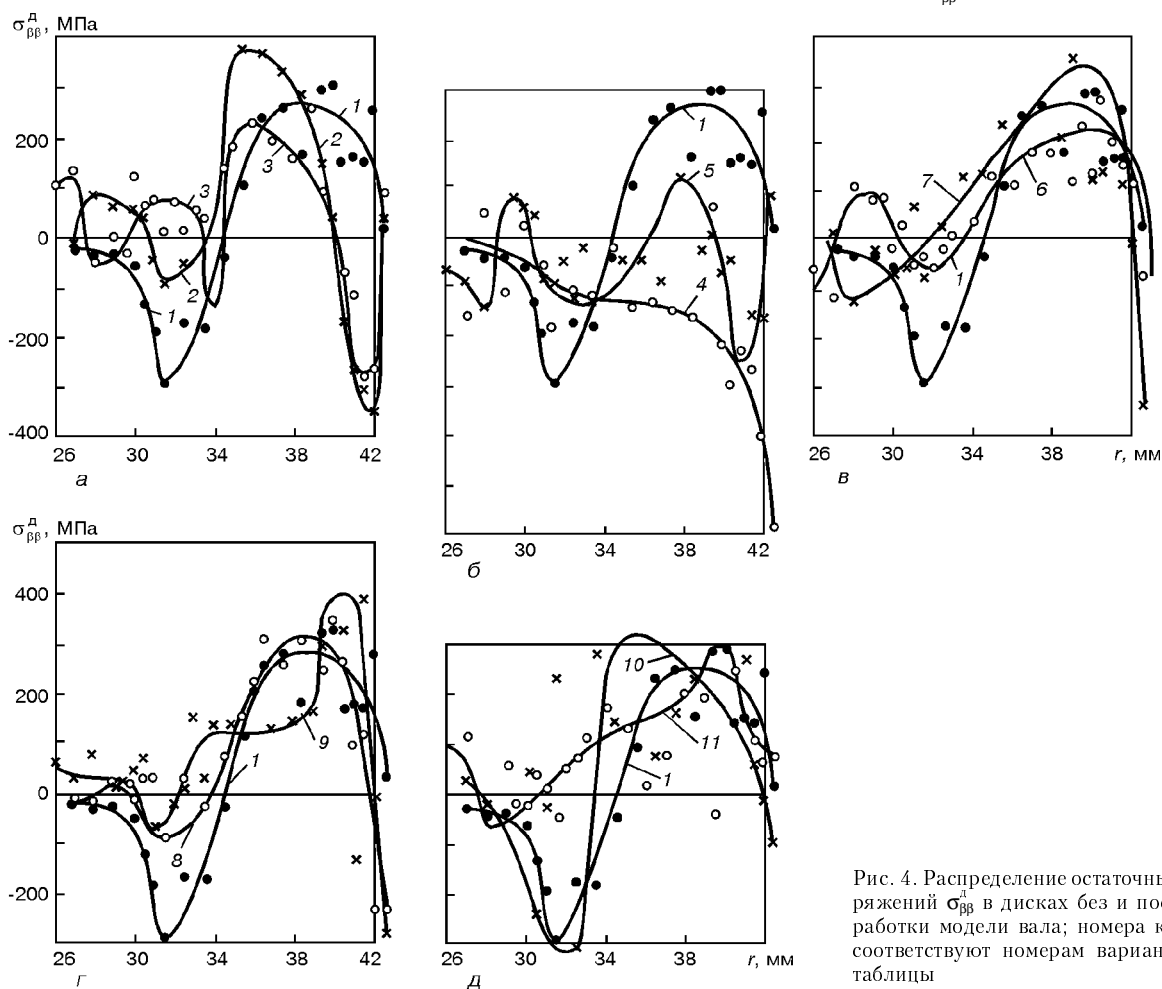


Рис. 4. Распределение остаточных напряжений $\sigma_{\beta\beta}^d$ в дисках без и после обработки модели вала; номера кривых соответствуют номерам вариантов из таблицы

либо синхронной [11] дифракции, которые требуют специального дорогостоящего оборудования.

При измерении остаточных напряжений в дисках $\sigma_{\beta\beta}^d$ и σ_{rr}^d использовалась следующая последовательность. Для фиксирования уровня окружных деформаций диска при расточке и обточке выбран метод тензометрирования с помощью проволоочных датчиков сопротивления. На наружной поверхности диска радиусом $r = R_n$ (рис. 3, а) устанавливаются шесть или восемь предварительно протарированных тензодатчиков для измерения окружных деформаций $\epsilon_{\beta\beta}(R_n)$. В центре диска просверливается отверстие радиусом $r_p = r_0$ и снимается первое показание деформаций $\epsilon_{\beta\beta}(R_n, r_p = r_0)$. Затем это отверстие растачивается до размера $r_p = r_1$, снимается новое показание $\epsilon_{\beta\beta}(R_n, r_p = r_1)$ и т. д. Расточка основного металла выполнялась начиная с $r_p =$

$= 10$ мм с последующими снятиями слоев толщиной 2,5... 3 мм. Величина $\epsilon_{\beta\beta}(R_n, r_p)$, взятая с обратным знаком, определяет упругое изменение окружных деформаций $\epsilon_{\beta\beta}^e(R_n, r)$ в зависимости от действующих на поверхности радиуса $r = r_p$ радиальных остаточных напряжений $\sigma_{rr}(r_p)$. Соответственно имеет место зависимость

$$\sigma_{rr}^e(r_p) = -\frac{E\epsilon_{\beta\beta}^e(R_n)}{2} \left(\frac{R_n^2}{r_p^2} - 1 \right) \quad (1)$$

Расточку заканчивают при $r_p = R_p \approx \frac{1}{2}R_n$. Затем на поверхности радиуса $r_p = R_p$ устанавливают датчики для измерения окружных деформаций $\epsilon_{\beta\beta}(R_p)$ и производят послынную обточку наружной повер-



хности диска. Каждую из обточек заканчивают при $r = r_{об}$ и толщиной снятого слоя $0,5... 2$ мм. Изменяемая после каждой обточки деформация $\epsilon_{\beta\beta}(R_p)$, взятая с обратным знаком, с учетом известных напряжений $\sigma_{rr}(R_p)$ позволяет определить остаточные напряжения $\sigma_{rr}(r_{об})$ по зависимости

$$\sigma_{rr}(r_{об}) = \sigma_{rr}(R_p) \frac{R_p^2/R_n^2}{1 - R_p^2/R_n^2} \left[\frac{R_n^2}{r_{об}^2} - 1 \right] + \frac{E\epsilon_{\beta\beta}^e(R_p)}{2} \left[\frac{r_{об}^2}{R_p^2} - 1 \right]. \quad (2)$$

Здесь $\epsilon_{\beta\beta}^e(R_p) = -\epsilon_{\beta\beta}^e(R_p, r_{об})$; $R_p < r_{об} < R_n$; E — модуль нормальной упругости основного и наплавленного металлов, равный соответственно $2,06 \cdot 10^5$ и $1,91 \cdot 10^5$ МПа.

Описанный подход применен к наплавленным моделям валов после соответствующей механической обработки и без нее (см. таблицу).

Приведенные на рис. 3, б экспериментальные значения $\sigma_{\beta\beta}^n$ и σ_{rr}^n для варианта № 1 без механической обработки достаточно хорошо согласуются с расчетными. На рис. 4 (кривая 1) представлены экспериментальные значения $\sigma_{\beta\beta}^n$ после соответствующей механической обработки в сопоставлении с данными для варианта № 1. Несмотря на достаточно высокий разброс экспериментальных данных, что частично связано с погрешностями методики (в большей степени для операций расточки и обточки), наблюдается достаточно четкая тенденция образования в поверхностном слое сжимающих напряжений. Толщина такого слоя зависит от вида обработки. При обычных режимах УУО (рис. 4, в, г) толщина поверхностного слоя с отрицательными значениями напряжений не превышает 0,5 мм, что достаточно хорошо согласуется с результатами работы [7], где показано, что толщина наклепанного слоя при такой обработке близка к этому значению. Обкатка роликом (рис. 4, а) на обычных режимах [3] увеличивает зону сжатия до 2 мм, а обработка взрывом может существенно расширить эту зону в зависимости от энергии взрывной обработки. Так, при малых значениях этой энергии толщина слоя около 2, а при больших достигает 15 мм (соответственно кривые 5 и 4 на рис. 4, б). Рассматривалась возможность увеличения толщины наклепанного слоя при УУО за счет предварительного нагрева вала (перед обработкой) до температуры 400 °С (рис. 4, д). Однако эффективность такого нагрева весьма незначительна. Более того, при последующем охлаждении за счет разнородности свойств основного и наплавленного металлов уровень сжимающих напряжений, полученных при обработке, частично снижается.

Из рассмотренного следует, что механическая обработка наплавленного вала наиболее целесообразна

Residual stresses arising in surfaced shafts and influencing their cyclic loading resistance, have been experimentally studied. It is shown that subsequent mechanical treatment of the shafts (roll burnishing, ultrasonic shock peening, explosion treatment), promotes creation of compressive stresses in the surface layer.

разна при достаточно малых толщинах наплавленного слоя, когда зона сплавления — место потенциального образования усталостных трещин — находится в области низких либо даже сжимающих остаточных напряжений. Однако даже при относительно невысоких толщинах наклепанного слоя, как, например при УУО, можно ожидать повышения сопротивления усталостным нагрузкам в том случае, когда усталостные трещины без обработки инициируются в поверхностном слое.

Выводы

1. Обработка наплавленных валов (УУО, обкатка роликом и взрывом) способствует созданию в поверхностном слое сжимающих напряжений. Толщина слоя сжимающих напряжений в аустенитной наплавке при обычных режимах УУО не превышает 0,5 мм, при обкатке роликом ≈ 2 мм, а при обработке взрывом может изменяться в широких пределах (2... 15 мм) в зависимости от уровня распределения энергии взрыва.

2. Для предупреждения усталостных трещин, инициируемых на поверхности наплавленного слоя, эффективно применение как УУО, так и обкатки роликом.

1. Кравцов Т. Г., Стальниченко О. И., Олейник Н. В. Восстановление деталей наплавкой и оценка их прочности. — Киев: Виц. шк., 1994. — 250 с.
2. Бенца Ф. А., Богданов А. М. Исследование остаточных напряжений в наплавленных судовых валах // Реч. трансп. — 1955. — № 2. — С. 3–8.
3. Кудрявцев И. В., Саввина Н. М. Защита и восстановление крупных валов наплавкой с последующим наклепом в связи с их сопротивлением усталости // Исследование по упрочнению деталей машин. — М.: Машиностроение, 1972. — Кн. 3. — С. 151–157.
4. Кудрявцев И. В., Науменков Н. Е. Усталость сварных конструкций. — М.: Машиностроение, 1976. — 270 с.
5. Повышение сопротивления усталости сварных соединений взрывным нагружением / В. И. Труфяков, П. П. Михеев, В. И. Кулинов и др. // Автомат. сварка. — 1974. — № 9. — С. 29–32.
6. Статников Е. Ш., Шевцов Е. М., Куликов В. Ф. Ультразвуковой ударный инструмент для упрочнения сварных швов и уменьшения остаточных напряжений // Новые физические методы интенсификации технологических процессов. — М.: Металлургия, 1977. — С. 27–29.
7. Махиенко В. И., Кравцов Т. Г. Толщина пластинки деформированного слоя при ультразвуковой ударной обработке наплавленных изделий // Автомат. сварка. — 1986. — № 8. — С. 28–30.
8. Кравцов Т. Г. Повышение сопротивления усталости наплавленных валов ультразвуковой обработкой // Там же. — 1981. — № 10. — С. 35–38.
9. Численное исследование термомеханических процессов при наплавке валов судовых механизмов и устройств / В. И. Махненко, Е. А. Великованенко, Т. Г. Кравцов, В. В. Севрюков // Там же. — 2001. — № 1. — С. 3–11.
10. Mesurement of residual and applied stress using neutron diffraction / Ed. M. Hautching, A. Krawitz. — Boston, London: Kluwer akad. publ. dordrecht, 1989. — P. 115–128.
11. Evaluation of residual stresses in the bulk of materials by high energy synchrotron diffraction // J. of Nondestructive Evaluat. — 1998. — 17, № 3. — P. 129–140.

Поступила в редакцию 15.11.2000