

УДК 621.824

**В. П. Иванов, д-р техн. наук, проф., Т. В. Вигерина****МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ВАЛОВ С ПОКРЫТИЯМИ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ**

В работе приведены результаты фрактографических исследований изломов образцов, восстановленных различными наплавочными материалами электродуговой наплавкой в среде углекислого газа. Покрытия получены с помощью проволоки следующих марок: ПП-Нп-80Х20РЗТ, У7, 08Х13. Установлено, что очаговая усталостная трещина возникает в пограничной зоне между покрытием и подложкой. Выявлена и обоснована важная роль плавности перехода структуры покрытия и основы в обеспечении усталостной прочности. Максимальные значения усталостной прочности возникают при наплавке проволокой У7. Проволока не содержит легирующих элементов, поэтому при наплавке происходит выгорание углерода в большей степени, что приводит к снижению твердости покрытия, но при этом усталостная прочность валов выше, чем у валов с покрытиями из порошковой проволоки и проволоки 08Х13.

**Введение**

Развитие современного машиностроения тесно связано с решением задач прочности и пониманием процессов разрушения материалов под воздействием эксплуатационных нагрузок. Широкое применение покрытий для восстановления деталей машин позволяет вернуть функциональные свойства поверхности и увеличить конструкционную прочность изделия. Предел прочности и вязкость неоднозначно изменяются при нанесении восстановительных покрытий или изменении химического состава наносимого сплава. Создание различных неравновесных структур в покрытии и переходной зоне повышает прочность, твердость, износостойкость, но снижает усталостную прочность.

В процессе наплавки в зонах, нагреваемых до температуры выше фазовых превращений и вследствие ускоренного охлаждения как в наплавленном металле, так и в околошовной зоне, протекают следующие процессы:

- выгорание легирующих элементов;
- возникновение внутренних остаточных напряжений;
- образование неравновесных структур, таких как перенасыщенные углеродом и легирующими элементами твердые растворы;
- увеличение размеров зерна (зона

перегрева), которые оказывают неоднозначное влияние на эксплуатационные свойства валов.

С одной стороны, неравновесные метастабильные структуры обеспечивают высокую твердость, прочность и износостойкость, с другой – неравновесность структуры поверхностных слоев, увеличенные размеры зерна, внутренние остаточные растягивающие напряжения снижают сопротивление ударным и циклическим нагрузкам.

Для валов с покрытиями наиболее актуальным вопросом является повышение сопротивляемости циклическим нагрузкам [1–3], хотя сам механизм в настоящее время для данных случаев остается малоизученным, поэтому его изучение является актуальной проблемой.

Среди физических методов изучения связи состава и структуры восстановленных деталей с его циклической прочностью особое место отводится исследованию поверхностей разрушения (изломов), поскольку излом наиболее четко отражает строение и свойства материала в локальном объеме, в котором протекает процесс разрушения. В ряде случаев эксплуатационных разрушений и повреждений только по излому можно сделать заключение о характере и причинах поломки и авариях. Поэтому осо-

бое место в данных исследованиях занимают фрактографические исследования.

*Цель работы* заключалась в исследовании механизма разрушения валов с покрытиями, работающих в условиях циклического нагружения с использованием фрактографических методов исследования.

### **Материалы и методика исследований**

В качестве материала для изготовления образцов использовали сталь 45. Образцы изготавливались в соответствии с

ГОСТ 25.502-79 (рис. 1).

Для нанесения покрытий использовали проволоки марок ПП-Нп-80Х20РЗТ, У7 и 08Х13. Химический состав наплавляемых проволок приведен в табл. 1.

Покрытия на образцы наносили с помощью электродуговой наплавки в среде диоксида углерода.

После наплавки проводили шлифование вала на круглошлифовальном станке модели 3А151 до шероховатости Ra = 0,16...0,32 мкм.



Рис. 1. Образец для проведения испытаний на усталостную прочность

Табл. 1. Химический состав наплавляемых проволок

Марка проволоки	Химический состав, масс. %							
	C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	B	Fe
ПП-Нп-80Х20РЗТ ГОСТ 26101-84	0,7–0,9	≤0,8	≤0,8	19–21	–	≤0,6	3–5	Основа
У7	0,65–0,74	0,17–0,33	0,17–0,33	0,2 max	0,25 max	0,25 max	–	Основа
08Х13	≤0,08	≤0,8	≤0,8	12–14	–	≤0,6	–	Основа

Усталостные испытания проводились на машине УКИ-10М. Разрушение образца приводило к остановке машины и счётчика, что позволяло определить количество циклов, предшествующих разрушению.

Фрактографические исследования проводились на разрушившихся образцах с покрытиями визуально и на микроскопе МПБ-2.

### **Обсуждение результатов исследования**

Изломы представляют собой непосредственный результат нарушения

сплошности материала и являются своеобразной фотографией истории разрушения. В [4] было отмечено, что при усталостном разрушении на изломе можно обнаружить две зоны: мелкозернистую, которая может принимать фарфоровидное строение, а иногда и блестящий шлифованный вид, и с волокнистым строением. Первая из них называется зоной усталостного разрушения, развивается постепенно. Скорость ее развития зависит от степени перегрузки. При значительной перегрузке первая зона быст-

ро переходит во вторую – зону статического разрушения. Вторая зона образуется быстро, в течение одного или нескольких циклов нагрузки. Также на поверхности усталостного разрушения можно наблюдать специфические полосы, названные следами фронта усталостной трещины [5]. Относительно причин образования усталостных полос на изломах существуют различные точки зрения. Полагали, что усталостные полосы образуются вследствие пауз в нагружении (периодов отдыха) при небольшом пластическом течении материала в устье трещины. Образование таких линий связывали также с влиянием пластической деформации в устье трещины при высоких нагрузках. Согласно другим представлениям усталостные линии образуются вследствие упрочнения дна трещины при работе детали при пониженных или повышенных напряжениях. При

этом предполагается, что на пути продвижения трещины создается упрочненный слой металла, разрушение которого фиксируется усталостными линиями. Также выдвигалось предположение, что одной из причин образования усталостных линий является преодоление трещиной прочных препятствий.

Визуальное изучение изломов образцов не выявляет характерных усталостных линий, присущих, например, излому стали 20, X18H10T после усталостного разрушения, так как испытания проводились при постоянном номинальном напряжении, без перегрузок и периодов отдыха. На изломах всех трех образцов зона усталостного разрушения превышает зону статического разрушения (рис. 2), что говорит об усталостном виде излома.



Рис. 2. Поверхность усталостного излома образца из стали 45, наплавленного проволокой: а – ПП-Нп-80Х20РЗТ; б – 08Х13; в – У7

Строение усталостных изломов зависит в основном от трех условий [4]:

- вид нагружения в процессе зарождения и развития усталостной трещины;
- сопротивление разрушению детали, определяемое ее геометрической формой, свойствами металла и состоянием поверхности;
- воздействие внешней среды.

Исследования проводились на об-

разцах, восстановленных наплавкой в среде диоксида углерода проволоками с различным химическим составом. Вид нагружения для всех случаев был одинаков – консольный изгиб при кручении, в котором напряжения изменялись по симметричному циклу (коэффициент асимметрии  $R\sigma = -1$ ). Воздействия внешней среды для всех случаев испытаний были постоянны. Следовательно, ос-

новным фактором, оказывающим влияние на строение излома, являлся химический состав материала наносимых покрытий.

В [4] на усталостном изломе авторы выделяют пять зон.

1. Фокус излома – микроскопическое место зарождения излома.
2. Очаг разрушения – макроскопическое место зарождения излома.
3. Участок избирательного развития трещины, занимающий обычно всю площадь зоны собственно усталостного разрушения.
4. Участок ускоренного развития трещины, образующийся перед окончательным разрушением детали.
5. Зона долома.

Полученные результаты исследований изломов образцов с покрытиями (см. рис. 2) показывают, что они имеют сходство с классическими усталостными изломами образцов без покрытия. Визуальное изучение образцов, полученных восстановлением материалов различного химического состава, позволяет сделать выводы о наличии в изломе образцов с покрытием следующих зон: очага разрушения; участка избирательного развития трещины; зоны долома.

Исследование микроструктуры изломов позволяет выделить четыре слоя с разными микроструктурами в сечении образца восстановленного наплавкой (рис. 3).

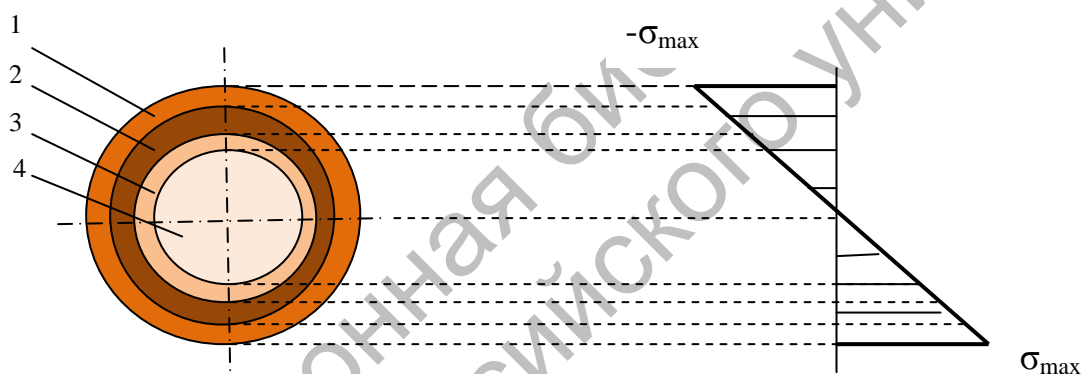


Рис. 3. Схема распределения основных зон в сечении восстановленного образца: 1 – основной металл; 2 – зона термического влияния; 3 – переходная зона; 4 – покрытие

Согласно известным теориям прочности напряжения в круглом сечении образца при симметричном цикле нагружения распределяются таким образом, что максимальные напряжения возникают на поверхности, а следовательно, усталостная прочность образцов будет зависеть от микроструктуры полученного слоя. Однако полученные экспериментальные данные (рис. 4) и анализ соответствующих им микроструктур свидетельствуют, что основное влияние на усталостную прочность оказывает переходная зона 2 (см. рис. 3). В работе под переходной зоной подразумевается зона активного пе-

ремешивания наплавляемого материала и основы.

В переходной зоне уровень напряжений от изгибающих моментов ниже, чем на поверхности образца, однако за счет ее строения возникает сильное влияние на усталостную прочность. Объяснить данное явление и эффект можно следующим характеристиками переходной зоны:

- резкий переход между разными по свойствам материалами;
- неблагоприятные растягивающие напряжения после наплавки;
- скопление большого количества дефектов кристаллической решетки [1].

Покрытия, полученные в результате наплавки, отличаются высокой твердостью и износостойкостью, но при этом они характеризуются повышенной хрупкостью, снижая усталостную прочность, т. к. сопротивление росту трещин у мате-

риала этих покрытий минимально. Основной металл в зоне термического влияния охрупчен, потому что покрытие получали дуговым методом со значительными тепловложениями [6].

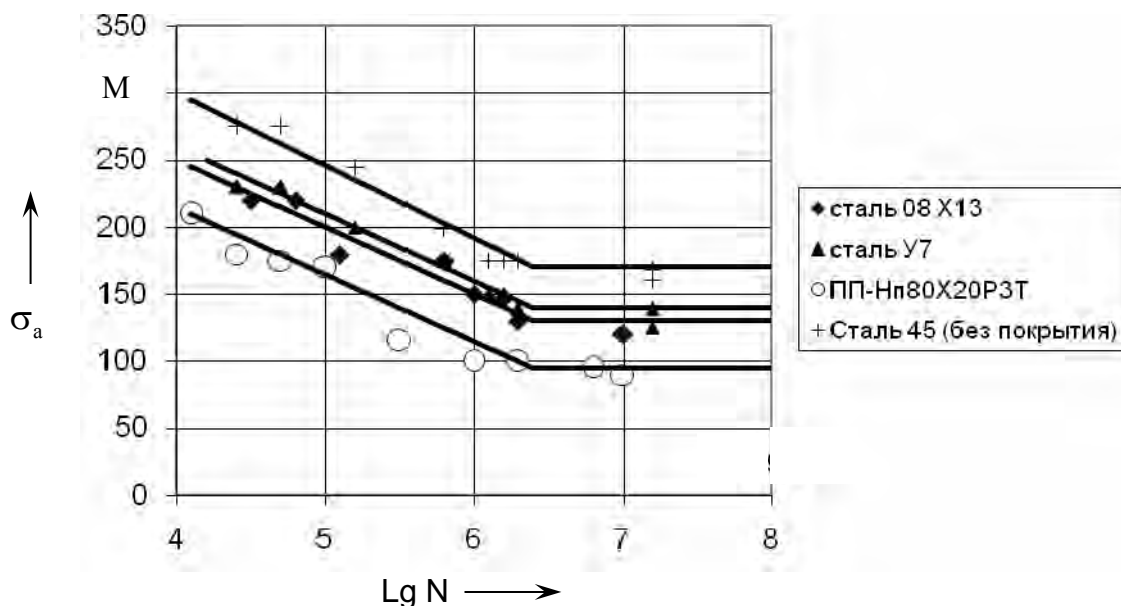


Рис. 4. Кривые усталости образцов с наплавленными покрытиями: 1 – сталь 08X13 (♦); 2 – сталь У7 (▲); 3 – ПП-Нп-80X20P3Т (○)

Максимальные значения усталостной прочности получены при наплавке проволокой У7 (см. рис. 4). В нашем случае твердость наплавленного металла определяется содержанием углерода: чем выше содержание углерода, тем выше твердость. Проволока не содержит карбидообразующих легирующих элементов, поэтому при наплавке и при перемешивании с основой (сталь 45) происходит более интенсивное выгорание углерода, что приводит к снижению твердости материала покрытия, но при этом усталостная прочность образцов повышается.

Внешний вид излома вала восстановленного наплавкой проволокой У7 имеет мелкозернистую структуру (см. рис. 2, в) по сравнению с другими изломами образцов восстановленных наплавкой проволоками 08X13 и ПП-Нп-80X20P3Т, что говорит о более высоких значениях пре-

дела выносливости и подтверждается полученными экспериментальными данными (см. рис. 4).

На рис. 5 приведены микроструктуры покрытий, полученных наплавкой различными марками проволоки. Как видно на рис. 5, в, микроструктура покрытия проволокой У7 однородна с микроструктурой основы, переход от основного металла к наплавленному визуально определяется лишь по размеру зерен. Проволока не содержит легирующих элементов и коэффициент термического расширения материала покрытия и основы практически одинаков, что снижает риск появления трещин и благоприятно сказывается на усталостной прочности.

По [7] процесс разрушения на стадии развития трещины состоит из следующих четырех этапов:

- 1) инкубационный, на котором скорость распространения трещины постепенно возрастает;
- 2) период торможения, характеризующийся замедлением роста трещины;
- 3) стационарный, когда скорость

развития трещины постоянна;

- 4) ускоренный, иногда лавинообразный период роста трещины со всевозрастающей скоростью вплоть до полного разрушения.

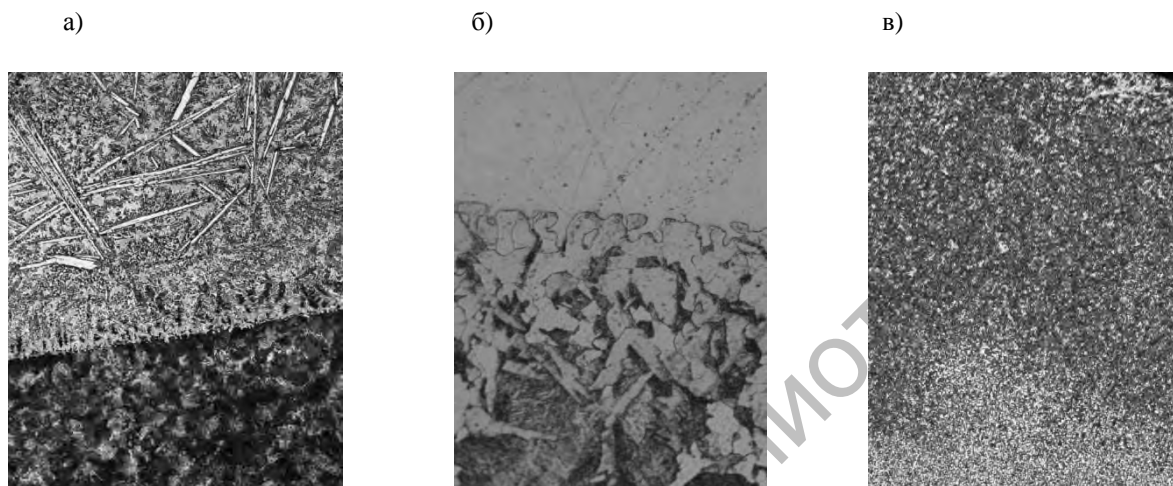


Рис. 5. Микроструктура материала вала, наплавленного проволокой: а – ПП-Нп-80Х20Р3Т ( $\times 100$ ); б – сталь 08Х13 ( $\times 500$ ); в – сталь У7 ( $\times 100$ )

Усталостная трещина зарождается в переходной зоне и затем развивается вглубь образца или детали, образуя острый надрез. Дальнейшее распространение усталостных трещин продолжается до тех пор, пока сечение окажется столь малым, что действующие в нем напряжения превысят разрушающие, тогда происходит быстрое, лавинообразное, хрупкое разрушение (см. рис. 2). Можно сделать предположение о сходстве и между механизмами усталостного разрушения валов как с покрытием, так и без. Отличие заключается в том, что очаговая усталостная трещина возникает в пограничной зоне между покрытием и подложкой. Здесь напряжения от приложенной нагрузки достаточно велики, остаточные сжимающие напряжения, созданные при нанесении покрытия, равны нулю или меняют знак. Прочностные свойства переходной зоны ниже, чем у покрытия из-за дефектов подложки. Вероятно, строение, которое приобретает пограничная зона между покрытием и подложкой, оказывает решающее

влияние на процесс начала роста магистральной усталостной трещины, что косвенно подтверждается получением максимальных значений усталостной прочности для валов наплавленных проволокой из стали У7 (см. рис. 4).

В этом случае наблюдается наименьший градиент изменения структуры от покрытия к материалу вала (рис. 5, а).

Минимальные значения предела усталостной прочности получены для валов, наплавленных порошковой проволокой ПП-Нп-80Х20Р3Т, в этом случае в переходной зоне градиент структурных изменений максимален (рис. 5, б).

### Выводы

Установлено, что очаговая усталостная трещина возникает в пограничной зоне между покрытием и подложкой. Выявлена и обоснована важная роль плавности перехода структуры покрытия и основы в обеспечении усталостной прочности. Предложена гипотеза о влиянии строения переходной зоны в

восстановленных валах на усталостную прочность образцов.

При восстановлении валов наплавкой в среде диоксида углерода, работающих в условиях циклического нагружения, рекомендуется использовать материалы, содержащие малое количество легирующих элементов, при одинаковых режимах нанесения, так как они оказывают решающее влияние на формирование микроструктуры переходной зоны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Завистовский, В. Э.** Механика разрушения и прочность материалов с покрытиями / В. Э. Завистовский. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 1999. – 144 с.

2. Восстановление деталей машин : справочник / Ф. И. Пантелеенко [и др.]. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.

3. **Максимович, Г. Г.** Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями / Г. Г. Максимович, В. Ф. Шатинский, В. И. Копылов. – Киев : Наукова думка, 1983. – 264 с.

4. **Иванова, В. С.** Природа усталости металлов / В. С. Иванова. – М. : Metallurgy, 1975. – 456 с.

5. **Гордеева, Т. А.** Анализ изломов при оценке надежности материалов / Т. А. Гордеева, И. П. Жегина. – М. : Машиностроение, 1978. – 200 с.

6. **Лившиц, Л. С.** Металловедение для сварщиков (сварка сталей) / Л. С. Лившиц. – М. : Машиностроение, 1979. – 179 с.

7. **Фридман, Я. Б.** Механические свойства металлов / Я. Б. Фридман. – М. : Оборонгиз, 1952. – 282 с.

Полоцкий государственный университет  
Материал поступил 23.12.2008

**V. P. Ivanov, T. V. Vigerina**  
**Failure mechanism of plated shafts while functioning in cyclic loading conditions**

The article presents the results of the fractographic research of fractures of samples restored with different surfacing materials by electric arc in carbon dioxide environment by Y7, ПП-Нп-80Х20Р3Т and 08Х13 wires. It has been stated that the fatigue crack appears in the border zone between the coat and the bottom layer. It has been found and stated that smooth transition of the cover and the base plays a very important role in fatigue resistance assurance. Maxima of fatigue resistance is observed while Y7 wire welding. The wire doesn't contain alloying elements that is why carbon burns at greater degree which leads to coating hardness reduction. The fatigue resistance of the shafts is higher than that of the shafts coated with flux cored wire and 08Х13 wire.