

УДК 621.791.927

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОПОКРЫТИЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗВИТИЮ ТРЕЩИН

Е.В. Бережная, к.т.н., докторант,  
НТУУ «Киевский политехнический институт»

*Аннотация.* Представлены исследования образования усталостной трещины, скорости ее роста и распространения до разрушения образца под действием приложенных статических сил в зависимости от структуры поверхностного слоя, включающего нанесенное электроконтактной наплавкой покрытие и зону термического влияния.

*Ключевые слова:* электроконтактная наплавка, поверхностный слой, усталостные испытания, скорость роста трещин.

## ВПЛИВ СТРУКТУРИ МЕТАЛЛОПОКРИТТЯ НА ОПР РОЗВИТКУ ТРИЩИН

О.В. Бережна, к.т.н., докторант,  
НТУУ «Київський політехнічний інститут»

*Анотація.* Подано дослідження утворення втомної тріщини, швидкості її зростання та розповсюдження до руйнування зразка під впливом прикладених статичних зусиль залежно від структури поверхневого шару, що містить нанесене електроконтактним наплавленням покриття та зону термічного впливу.

*Ключові слова:* електроконтактне наплавлення, поверхневий шар, випробування на втомність, швидкість зростання тріщин.

## INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF METAL-COATING ON THE RESISTANCE TO THE GROWTH OF CRACKS

O. Berezhna, Ph. D. (Eng.), Ph. D. student,  
NTUU «Kyiv Polytechnic Institute»

*Abstract.* Study of the fatigue crack formation, the rate of its growth and extantion before the destruction of a sample under the action of applied static forces, depending on the structure of the surface layer, including the coating deposited by the electric contact surfacing and the zone of thermal influence are given.

*Key words:* electric contact surfacing, surface layer, fatigue test, crack growth rate.

### Введение

Конструктивная прочность наплавленных электроконтактной наплавкой деталей, т.е. прочность в окончательно обработанном состоянии зависит от структуры поверхностного слоя [1] (наплавленного покрытия и зоны термического влияния), которая в широких пределах может изменяться термической об-

работкой [2]. Получение необходимой прочности определяется тем, насколько оптимальна полученная микроструктура с точки зрения сопротивления действующим напряжениям. Поскольку при электроконтактной наплавке возникает разная структура по сечению образца, разными должны оказываться и прочность, и чувствительность к снижению усталостной прочности из-за кон-

центрации напряжений. Поэтому важным является определение структур, образующихся при термообработке наплавленных валов из конструкционных сталей, склонных к снижению усталостной прочности в условиях концентрации напряжений и установление на этой основе оптимальной структуры нанесенного поверхностного слоя. Склонность к торможению трещин является одной из важнейших характеристик металлопокрытия. Учитывая, что уменьшение скорости роста трещин повышает срок службы и надежность восстановленных деталей в эксплуатации, оценка эффективности конкретной технологии является актуальной.

### Анализ публикаций

Усталостному повреждению предшествует зарождение и развитие трещин, и далее происходит хрупкое разрушение без видимых пластических деформаций [3]. При выборе материала и рациональных технологий для восстановления и упрочнения электроконтактной наплавкой деталей, работающих в условиях циклических нагрузок, большое значение имеют не только характеристики стандартных механических свойств и предел выносливости композиционных наплавочных материалов, но и сопротивление развитию трещин [4].

### Цель и постановка задачи

Целью работы является исследование влияния структурного фактора на распространение усталостных трещин в модельных образцах, имитирующих поверхностный слой с различным содержанием пластичных фаз.

### Материал и методика исследований

При экспериментальной оценке скорости роста усталостных трещин исходными данными являются зависимости между изменением длины трещины и числом циклов приложенных нагрузок. С возникновением в образце трещины поле напряжений она претерпевает существенное изменение: у вершины трещины возникает концентрация напряжений. Для характеристики этого явления используется параметр интенсивности напряжений  $K_1$ , отражающий совместное влияние приложенных нагрузок и длины трещины на напряженное состояние у вершины трещины. Коэффициент  $K_1$  отражает перераспреде-

ние напряжений в образце вследствие образования трещин и характеризует величину усилий, передающихся через область у вершины трещины.

Переменные нагрузки и длина трещин согласно [5] обобщаются одним параметром  $\Delta K$  – изменением интенсивности напряжения за цикл нагружения. Зависимость между скоростью роста трещин и фактором интенсивности напряжений выражается уравнением

$$\Delta K = \frac{3\Delta PL}{bw^2} \left[ 1,93 \left( \frac{l_i}{b} \right)^{\frac{1}{2}} - 3,07 \left( \frac{l_i}{b} \right)^{\frac{3}{2}} + 14,53 \left( \frac{l_i}{b} \right)^{\frac{5}{2}} - 25,11 \left( \frac{l_i}{b} \right)^{\frac{7}{2}} + 25,8 \left( \frac{l_i}{b} \right)^{\frac{9}{2}} \right],$$

где  $L$  – расстояние между опорами,  $L=200$  мм;  $l_i$  – текущая суммарная длина трещины с надрезом;  $b$ ,  $w$  – высота и толщина образца соответственно (рис. 1).

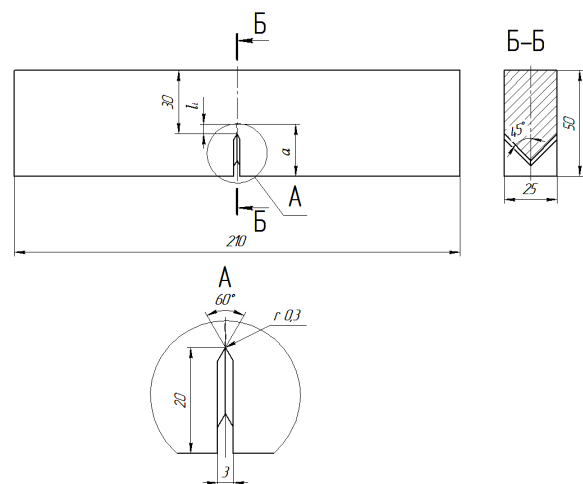


Рис. 1. Форма и размеры образцов для исследования скорости роста усталостной трещины

Скорость распространения трещин усталости изучали на модельных образцах из стали 40 и 40Х, которые имитировали структурное состояние поверхностного слоя с определенным содержанием пластичных фаз, регулируемое комбинированной термической обработкой. Образцы согласно [6] из стали 40 нагревали до температуры 820–840 °С, выдерживали при этой температуре и охлаждали в сыпучем графите до полного остывания [6]. Образцы из стали 40Х нагревали

до температуры 830–850 °С, затем также следовала выдержка и охлаждение в графите [6]. После термообработки заготовки строга-ли и шлифовали до окончательных размеров, а затем наносили надрез с помощью специальной фрезы. Был принят шевронный надрез, который выполнялся фрезой, заточенной по радиусу 0,3 мм. Применяемый метод содержит два этапа: образование усталостной трещины, в процессе которого представляется возможным измерить скорость роста трещины, и распространение трещины до разрушения образца под действием приложенных статических сил.

Сущность испытания состоит в том, что модельный образец нагружают изгибающими и растягивающими усилиями, в котором от надреза, нанесенного механической обработкой, предварительно создается усталостная трещина. В процессе роста трещины определяется скорость ее развития, что требует изменения числа циклов и условий нагружения при прохождении трещиной определенных расстояний. Перед испытанием образцы по плоскости надреза полировали, как металлографический шлиф. У вершины надреза примерно через каждые 0,9–1,0 мм острой чертилкой проводили риски перпендикулярно предполагаемому ходу трещин (рис. 2).

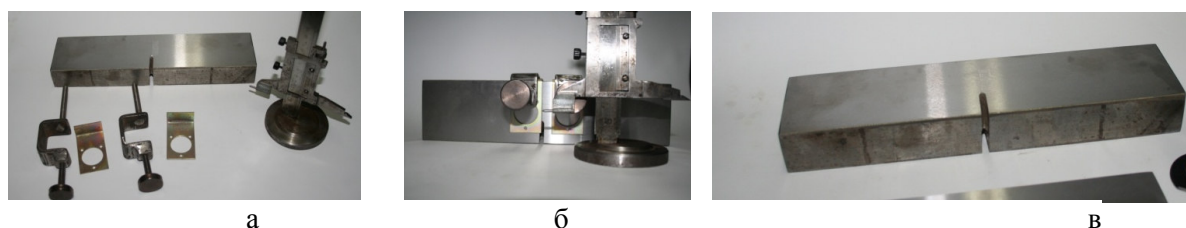


Рис. 2. Подготовка образца к испытаниям на деформацию изгиба: технологическая оснастка для разметки (а); образец в сборе технологическая оснастка для разметки (б); шлифованный образец с нанесенным надрезом (в)

Исследования проводили на гидравлической машине МУП-50 с пульсатором, обеспечивающем максимальную нагрузку в 0,25 МН. Схема нагружения – сосредоточенная нагрузка, создающая деформацию изгиба. Образцы устанавливали на специальном опорном приспособлении с роликами, свободно вращающимися в опорах относительно центров. Это позволило до минимума свести потери на трение в процессе испытания. Диаметр опорных роликов – 25 мм. При испытании опорные ролики равноуделяли от оси приложения нагрузки (в плоскости надреза) с точностью до ±1 мм. Образцы устанавливали так, чтобы плоскость была параллельной оси роликов. Непараллельность не превышала 2°. Нагрузку прикладывали в соответствии с рекомендуемой методикой работы на машине МУП-50. Минимальную нагрузку старались выбирать таким образом, чтобы она составляла около 10 % от максимальной.

Коэффициент асимметрии составлял 0,1. Испытания проводили при частоте приложения нагрузки 11 Гц. Через каждые 10 мин работы с помощью микроскопа изучали боковую поверхность образца в зоне предполагаемой траектории хрупкой трещины. После появления трещины ее длину измеряли через равные промежутки времени (5–10 мин) с помощью того же микроскопа с точностью до 0,01 мм. После увеличения трещины нагрузку снижали. Испытания продолжали до получения трещины длиной 3,0–4,0 мм, после чего испытания прекращали, образец с испытательной машины снимали (рис. 3). По экспериментальным данным определяли приращение трещины  $da$  за данное число циклов  $dN$ . Скорость роста трещины определяли по соотношению  $da/dN$ .

Результаты обработки экспериментальных данных представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1 Экспериментальные данные и элементы расчета скорости роста трещин усталости в модельных образцах из стали 40, охлажденной с температуры отжига в сыпучем графите

№ образца	$\Delta K$	$da$ , мм	$dN$ , цикл.	$\frac{da}{dN}$ , $\frac{\text{мм}}{\text{цикл}}$	$\lg(\Delta K)$	$\lg \frac{da}{dN}$	$l_i$ , мм
1	26,938387	0,6 $\Delta K$	18000	0,000033	1,4303	-4,4771	23,6
	28,1344427	0,7	28000	0,000025	1,4492	-4,6021	24,3
2	85,40154	2,3	20000	0,000115	1,9314	-3,9393	25,3
	35,063007	0,4	8000	0,00005	1,5448	-4,301	25,7

Таблица 2 Экспериментальные данные и элементы расчета скорости роста трещин усталости в модельных образцах из стали 40X, охлажденной с температуры отжига в сыпучем графите

№ образца	$\Delta K$	$da$ , мм	$dN$ , цикл.	$\frac{da}{dN}$ , $\frac{\text{мм}}{\text{цикл}}$	$\lg(\Delta K)$	$\lg \frac{da}{dN}$	$l_i$ , мм
1	58,087932	2	21000	0,0000952	1,76408592	-4,0212	30
	48,462428	1	9000	0,00011111	1,68540517	-3,9542	31
2	39,605972	1	42000	0,00002381	1,59776068	-4,6232	30
	37,060051	1	26000	0,0000385	1,56890601	-4,4150	31



Рис. 3. Общий вид трещины в модельном образце

Экспериментальные данные свидетельствуют о более высокой скорости роста трещин в стали 40X, чем в стали 40. Причем с увеличением интенсивности приложенных напря-

жений кривая  $\frac{da}{dN} - f(\Delta K)$  возрастает быстрее у стали 40X, чем у стали 40 (рис. 4).

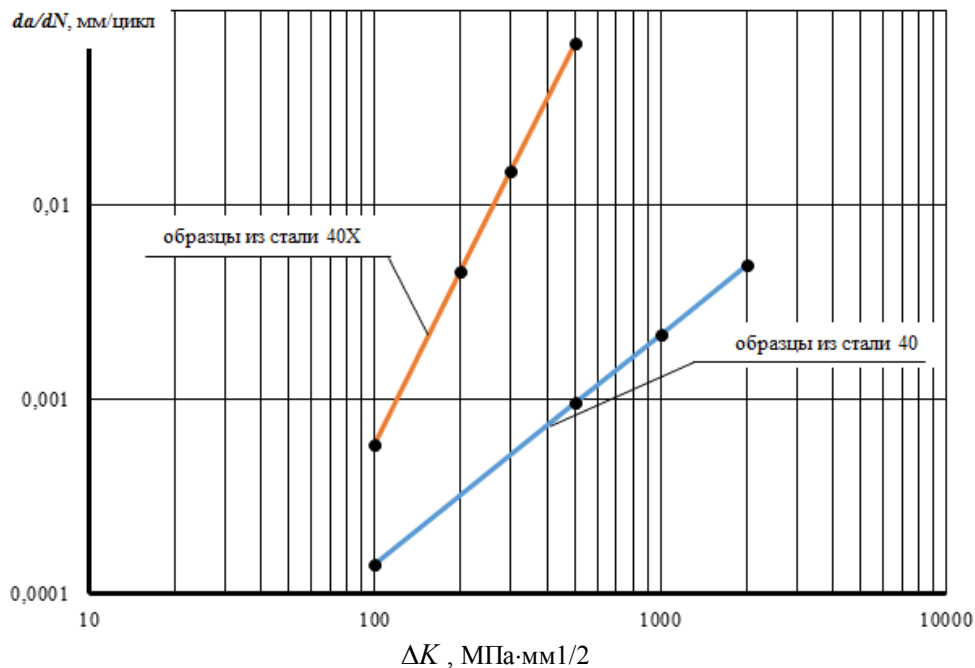


Рис. 4. Зависимость скорости подрастания усталостных трещин от изменения коэффициента интенсивности напряжений

Согласно полученным данным в стали 40X после отжига с охлаждением в сыпучем графите наблюдается больший объем перлита, чем в стали 40. Следовательно, скорость подрастания усталостных трещин зависит от объемного содержания в структуре избыточных пластичных фаз: чем больше в структуре пластичного феррита, тем медленнее растут трещины. Наоборот, увеличение объемного содержания перлита увеличивает скорость подрастания трещин. Наблюдаемое различие в скорости разрастания усталостных трещин в сталях с феррито-перлитной структурой с разным содержанием перлита объясняется общими закономерностями, касающимися сопротивления зарождению трещин и чувствительности к концентрации напряжений.

### Выводы

В данной работе установлены экспериментальные зависимости скорости подрастания усталостных трещин под действием циклических нагрузок в зависимости от структурного состояния. Скорость подрастания усталостных трещин у сталей с феррито-перлитной структурой напрямую зависит от количества избыточного феррита. Чем больше объем избыточной пластичной составляющей (феррита), тем меньше скорость развития усталостных трещин.

### Литература

1. Miller K.J. Fatigue Under Complex Stress / K.J. Miller // Metal Science. – 1977. – Vol. 2, № 8–9. – P. 432–438.
2. Бережная Е.В. Исследование влияния комбинированной термомеханической обработки на физико-механические характеристики покрытия / Е.В. Бережная, А.В. Лапченко, М.А. Турчанин // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. – 2016. – №38. – С. 125–131.
3. Paris P. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws / P. Paris, F. Erdogan // Journ. Basic Eng. – 1963. – Vol. 85, № 4. – P. 528–534.
4. Кузнецов В.Д. Повышение износостойкости деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой / В.Д. Кузнецов, Е.В. Бережная, А.В. Лапченко // Проблеми тертя та зношування. – 2016. – №3 (72). – С. 34–40.
5. Dowling N.E. Mechanical behavior of materials / N.E. Dowling // New-Jersey, Prentice-Hall. – 1993. – 357 p.
6. Бережная Е.В. Технологические особенности термообработки деталей, восстановленных электроконтактной наплавкой / Е.В. Бережная // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Том 4, №1. – С. 126–131.

Рецензент: Д.Б. Глушкова, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

---