

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЙ ВАЛОВ НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ

RESEARCH OF PUMP'S SHAFT DESTRUCTIONS

Исследования посвящены разрушениям валов насосных агрегатов. Изучение причин разрушений валов показывают, что они могут быть связаны с качеством металла, конструктивными недоработками и низкими механическими характеристиками, и как правило происходит под действием скручивающих напряжений при вращении с изгибом. Все эти и многие другие экспериментальные и теоретические исследования подтверждают, что связь между основными механическими характеристиками и твердостью существует, а это дает возможность определять показатели механических свойств металлов безобразцовыми методами.

Researches are devoted to destructions of pump shafts. Study of shaft destruction reasons show that they may be related to the quality of metals, design deficiencies and poor mechanical properties and as a rule take place under influence of the torsion tension emerging from rotation with deflection. All of these and many other investigations confirm that connection between main mechanical properties and hardness exists, that gives possibility to determine mechanical properties characteristics of metals with methods that do not involve using specimens.

**Е.А. Шаров,
И.Р. Кузеев**
ГОУ ВПО Уфимский
государственный нефтяной
технический университет

**E.A. Sharov,
I.R. Kuzeev**
Ufa State Petroleum Technological
University

Ключевые слова: механические испытания, неразрушающий контроль, твердость, вал, дефект, предел прочности, микроструктура.

Keywords: mechanical tests, non-destructive check, hardness, shaft, defect, ultimate strength, microstructure.

Разрушение вала при эксплуатации может привести к выходу из строя всего насоса, восстановление которого будет невозможным или экономически нецелесообразным. Разрушение — это действительно процесс сложной внутренней перестройки металла под действием нагрузок. При этом происходит ослабление и разрыв межатомных связей [1].

Выделяют следующие основные виды (механизмы) разрушения конструкционных материалов: вязкое или пластическое, хрупкое, усталостное, ползучесть, коррозионное, эрозионное [2,3]. Как показывают исследования, причинами разрушения валов являются: наличие дефектов металлургического характера; растягивающие остаточные напряжения; высокие локальные напряжения в отдельных участках вала; неоптимальность радиусного перехода между стенками и дном шпоночной канавки; дефекты, возникающие при ремонте валов. Этому способствуют дополнительные нагрузки на вал при расцентровках, от гидравлических сил в проточной части насоса, особенно при изменении режима работы, от неравномерности теплового расширения и др.

В первом случае осмотр внешнего вида исследуемого вала установлено, что разрушение представляет собой поперечный обрыв по канавке в зоне галтельного перехода диаметров ($\varnothing 59$ мм переходит в $\varnothing 65$ мм). Обрыв произошел в месте посадки полу-

муфты на вал по шпоночному пазу. Расположен обрыв на расстоянии 180 мм от торца вала, на котором посажена полумуфта (рисунок 1).



Рисунок 1. Внешний вид разрушенного конца вала, на котором была посажена полумуфта.

Плоскость излома перпендикулярна оси вала. Излом вала по месту разрушения кристаллический, отдельные участки при вращении стерты. От поверхности вала к зоне долома идут мелкие рубцы, направленность которых свидетельствует о действии скручивающих напряжений. Расположение зоны долома свидетельствует о действии на металл вала изгибных напряжений при вращении (рисунок 3).

В месте посадки муфты наблюдаются следы контактного выкрашивания металла, что свидетельствует о трении муфты о вал (рисунок 2), вызванном несоосностью конструкции.



Рисунок 2. Контактное выкрашивание в месте посадки муфты.

Характер излома свидетельствует о разрушении вала под действием скручивающих напряжений при вращении с изгибом.



Рисунок 3. Излом вала по месту разрушения.

Химический состав металла вала соответствует нормам для стали 40Х по ГОСТ 4543-71 «Сталь легированная конструкционная». Результаты химического анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав	Содержание элементов в %					
	С	Si	Mn	Cr	S	P
	0,36	0,21	0,53	0,93	0,022	0,020
Нормы по ГОСТ 4543-71 для стали 40Х	0,36-0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,80-1,10	не более	
					0,035	0,035

Металлографический анализ проводился на шлифах, изготовленных в диаметральной плоскости с выходом на излом.

Анализ макроструктуры показал наличие на поверхности вала неравномерно наплавленного слоя толщиной от 0,5 до 2,0 мм (рисунок 4). Наплавка заканчивается перед канавкой. Зона термовлияния наплавки достигает уровня излома.

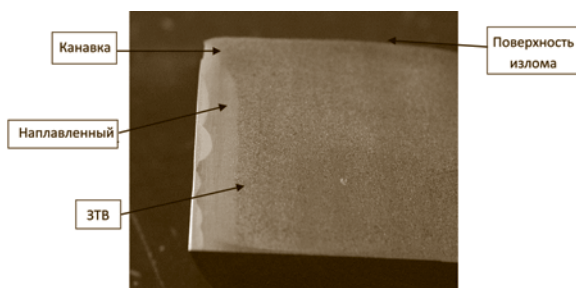
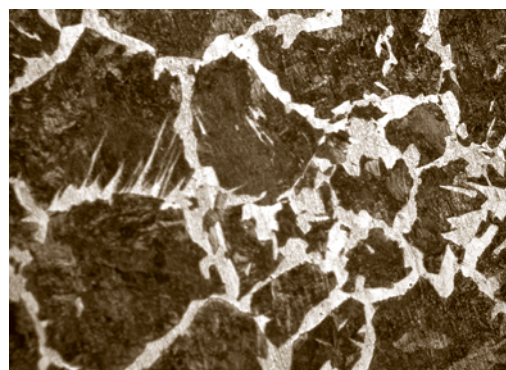


Рисунок 4. Наплавленный слой на поверхности вала.

Микроструктура металла вала состоит из перлита, окаймленного ферритной сеткой. Величина зерна по сечению вала неоднородная: от 1 балла до 5–6 балла шкалы по ГОСТ 5639-65 «Сталь. Методы выявления и определения величины зерна». Загрязненность металла неметаллическими включениями соответствует 2 баллу шкалы по ГОСТ 1778-70 «Сталь. Металлографический метод определения неметаллических включений». Металлургических дефектов не обнаружено.



100x

Рисунок 5. Микроструктура металла вала

Характер микроструктуры свидетельствует о том, что вал изготовлен из металла горячекатанного прутка не прошедшего соответствующую термическую обработку (закалка + отпуск) для повышения прочности. Микроструктура наплавки представляет собой сорбит с ферритными оторочками. Характер структуры свидетельствует о том, что вал был наплавлен электродами для сварки легированных сталей.

Замер твердости производился методом Бринеля по поперечному сечению вала на твердомере ТШ-2М при нагрузке 250 кг, диаметром шарика 2,5 мм. Твердость вала по сечению составляет 207НВ, что соответствует твердости для стали 45 без термообработки по ГОСТ 1050-88. Твердость наплавленного слоя составляет 225-220НВ.

На основании проведенного исследования установлено, что вал изготовлен из металла прутка, находящегося в состоянии поставки и не прошедшего соответствующую термическую обработку (закалка + отпуск) для повышения прочности, о чем свидетельствует состояние микроструктуры и значение твердости. Кроме того, вал изготовлен с конструктивными недостатками – наличие канавки и неравномерно наплавленного слоя. Разрушение вала связано с качеством металла и конструктивными недоработками, и произошло под действием скручивающих напряжений при вращении с изгибом.

Во втором случае осмотр внешнего вида исследуемого вала установлено, что разрушение представляет собой поперечный обрыв на диаметре 140 мм по месту посадки колеса перед первым рабо-

чим колесом. Плоскость излома перпендикулярна оси вала.

Место обрыва вала имеет темный (черный) окисленный цвет, свидетельствующий о нагреве металла вала до температур, превышающих 3000°C (температуры образования цветов побежалости).

Излом вала по месту обрыва “стерт” и “смазан” на 50% при вращении в момент разрушения. Оставшиеся несмазанные линии излома свидетельствуют о разрушении вала при вращении, что возможно связано с заклиниванием подшипника.



Рисунок 6. Излом вала по месту разрушения

Результаты химического анализа приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Химический состав	Содержание элементов в %						
	C	Si	Mn	Cr	V	S	P
	0,43	0,33	0,57	0,80	0,12	0,019	0,018
Нормы по ГОСТ 4543-71 для стали 40ХФА	0,37-0,44	0,17-0,37	0,50-0,80	0,80-1,1	0,10-0,18	не более	
						0,040	0,035

Химический состав металла вала соответствует нормам для стали 40ХФА по ГОСТ 4543-71. Результаты механических испытаний представлены в таблице 3.

Прочностные свойства и ударная вязкость не удовлетворяет требованиям ГОСТ 4543-71. Остальные механические свойства металла удовлетворяют требованиям стандарта.

Замер твердости производился методом Бринеля по поперечному сечению вала и ударных образцах, изготовленных из участка вала, расположенного вдали от разрушения. Твердость вала в очаге разрушения составляет 363НВ, что значительно превышает требования ГОСТ4543-71 для

Таблица 3.

Механические свойства	σ_b МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	δ %	ψ %	a_n кДж/ м ²
	7,75	4,79	18,0	51,0	431,5
	7,75	4,84	20,0	51,0	735,5
7,75	4,74	26,0	56,5	431,5	
Нормы по ГОСТ 4543-71 для стали 40ХФА после закалки и высокого отпуска	не менее				
	9,18	8,23	10,0	50,0	882,6

высокоотпущенной стали 40ХФА (не более 241НВ). Твердость вала, замеренная на ударных образцах, удовлетворяет требованиям ГОСТ4543-71 для высокоотпущенной стали 40ХФА (не более 241НВ) и составляет 222НВ.

Металлографический анализ проводился на шлифах, изготовленных в диаметральной плоскости вала с выходом на излом (участок с высокой твердостью) и для сравнения из ударных образцов (участок с нормальной твердостью).

Микроструктура металла вала вдали от разрушения (на ударных образцах) состоит из сорбита и участков избыточного феррита. Величина зерна соответствует 4–5, баллу шкалы по ГОСТ 5639. Наблюдается загрязненность металла неметаллическими включениями до 2 балла шкалы по ГОСТ 1778 (рисунок 7).

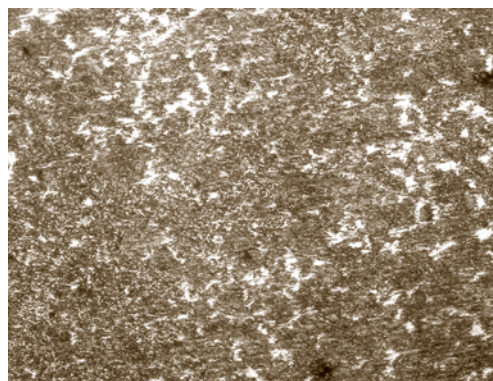


Рисунок 7. Микроструктура металла вала вдали от разрушения.

Избыточный феррит свидетельствует о неполной закалке металла вала, что подтверждается низкими прочностными характеристиками.

Микроструктура металла в очаге разрушения состоит из мартенсита с участками троостита по границам зерен. Величина зерна превышает 1 балл шкалы по ГОСТ 5639 (рисунок 8, 9).

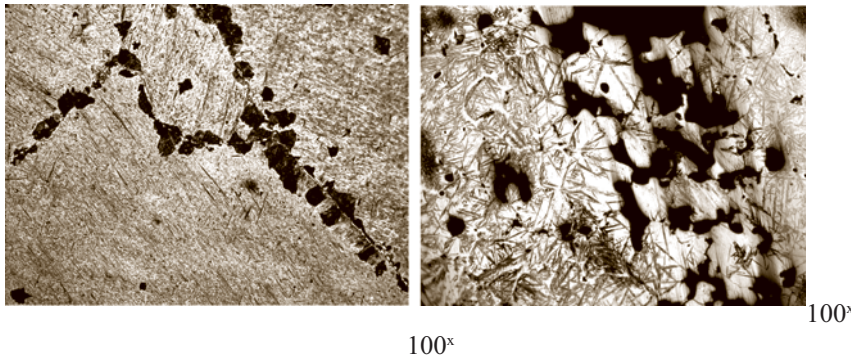


Рисунок 8,9. Микроструктура металла вала в очаге разрушения.

Характер микроструктуры (наличие мартенсита и участков аустенита), крупное зерно свидетельствует о том, что металл вала в очаге разрушения подвергся перегреву при температуре выше 1000°C и это подтверждается высоким значением твердости (363НВ).

На основании проведенного исследования установлено, что разрушение вала произошло в результате действия высокого уровня скручивающих напряжений, возникших возможно в результате заклинивания подшипника. Низкие прочностные свойства и ударная вязкость также могли способствовать разрушению вала.



Рисунок 10. Вал магистрального насоса НМ 10000-210 из стали 40Х, отработавшего 72000 часов



Рисунок 11. Распределение твердости по поверхностному слою вала НМ 10000-210

Также проведено измерение твердости поверхностного слоя вала магистрального насоса НМ 10000-210, отработавшего 72000 часов (рисунок 10). Результаты приведены на рисунке 11.

Замеры твердости производились методом Бринеля по поверхностному слою вала электронным динамическим твердомером ТДМ-2 [4]. Принимали твердость на участке как среднее из пяти значений. Твердость вала составляет 264,4-290,6 НВ, что соответствует твердости для стали 40Х после отжига по ГОСТ 4543-71.

Выводы

1. При использовании комплекса методов разрушающего контроля: механические испытания, химический анализ и металлографические исследования, установлено, что разрушение вала может быть связано с качеством металла, конструктивными недоработками и низкими механическими характеристиками, и как правило происходит под действием скручивающих напряжений при вращении с изгибом.

2. В первом случае разрушения микроструктура металла вала состоит из перлита, окаймленного ферритной сеткой, а при прохождении термообработки (закалка+отпуск) микроструктура вала должна состоять из сорбита, поэтому определили, что вал не прошел соответствующую термическую обработку для повышения прочности:

3. Получены результаты измерения твердости поверхностного слоя вала насоса НМ 10000-210 из стали 40Х, отработавшего нормативный ресурс 72000 часов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Куликов Д.В., Мекалова Н.В., Закиричная М.М. Физическая природа разрушения: учебное пособие. Уфа: УГНТУ, 1999. 395 с.
2. Горицкий В.М. Диагностика металлов. М.: Металлургиздат, 2004. 408 с.
3. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 624 с., ил.

4. В.Г. Борисов, М.П. Марковец, В.М. Матюшин. Контроль металла в энергетике. Киев: «Техника». 1980. 135 с.

Е. А. Шаров, аспирант каф. Машины и аппараты химических производств УГНТУ
E.A. Sharov
postgraduate student of Machines and Devices of Chemical Production Chair, USPTU

И. Р. Кузеев,
д.т.н., профессор, зав. каф. Машины и аппараты химических производств УГНТУ
I.R. Kuzeev
PhD, professor, Head of Machines and Devices of Chemical Production Chair, USPTU
e-mail: Kuzeev2002@mail.ru
тел./tel.: (347) 243-17-75.