

УДК 621.78.019.8

UDC 621.78.019.8

**ФРАКТОДИАГНОСТИКА
ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ
ПОДЪЕМНОГО МЕХАНИЗМА БУЛЬДОЗЕРА**

**FRACTOGRAPHY OF OPERATION FAILURE
OF THE LIFTING GEAR OF BULLDOZER**

Яковлева Софья Петровна
д.т.н., профессор, зав. отд. материаловедения

Yakovleva Sofia Petrovna
Dr.Sci.Tech., professor, Head of the material science
department

Махарова Сусанна Николаевна
к.т.н., в.н.с.
*Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия*

Makharova Susanna Nikolaevna
Cand.Tech.Sci., leading researcher
*V.P. Larionov Institute of the physical-technical
problems of the North, Siberian branch of the RAS,
Yakutsk, Russia*

Исследованы природа и причины эксплуатационной поломки цельнометаллического штока гидроцилиндра бульдозера. Показано, что основной механизм разрушения – развивающаяся во времени усталость металла, инициированная погрешностями термообработки под хромирование

The nature and causes of operational failure of the all-metal hydraulic cylinder rod of a bulldozer were studied. It is shown that the main mechanism of failure was evolving in time metal fatigue, initiated by defects of the heat treatment for chromizing

Ключевые слова: БУЛЬДОЗЕР, ЭКСПЛУАТАЦИОННОЕ РАЗРУШЕНИЕ, УСТАЛОСТЬ, ХРОМИРОВАНИЕ, ЗАКАЛКА, НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Keywords: BULLDOZER, OPERATIONAL FAILURE, METAL FATIGUE, CHROMIUM COATING, QUENCHING, NONMETAL INCLUSIONS

Введение

Несмотря на успехи в развитии подходов к проектированию, изготовлению, диагностированию различных технических объектов, достаточно часто возникают их отказы, аварии и катастрофические разрушения. Исследование причин, вызвавших повреждение деталей техники и оборудования, позволяет не только выявить очаги, природу, последовательность процессов разрушения, но также является научной основой для повышения проектных характеристик и совершенствования технологий изготовления изделий машиностроения и конструкций. Для установления причин разрушения деталей машин и конструкций применяются методы фрактодиагностики, включающие в себя комплекс исследований с использованием фрактографии, металлографии, рентгеноструктурного анализа, механических испытаний при учете общих закономерностей процессов деформации и разрушения материалов на

различных масштабных уровнях [1-3]. Изломы представляют собой непосредственный результат нарушения сплошности материала, выявляют наиболее слабые места детали, содержат информацию о природе, особенностях и причинах разрушения. Таким образом, исследование причин разрушения деталей с учетом их структуры, свойств и условий эксплуатации материала является актуальной задачей.

В данной работе проведен анализ причин эксплуатационного разрушения левого цельнометаллического штока гидроцилиндра подъема отвала бульдозера после незначительной наработки в течение 550 моточасов. Аварийное разрушение штока произошло в дневную смену при проведении работ (толкание вскрытых в ночную смену торфов); температура окружающей среды на момент поломки составляла -25°C .

Цель данной работы: выявление природы и причин разрушения металла штока методом фрактодиагностики.

Методы исследования и аппаратура

Для определения химического состава основного металла и покрытия штока использованы спектрометры «Spectroport-F» и «Foundry-master UVR». Среднее значение содержания химических элементов получено по результатам трех измерений.

Анализ микроструктуры металла проведен с помощью металлографических микроскопов «Neophot-32» и «Axio Observer D1m».

Фрактографические исследования для выявления особенностей макроизлома проведены в стереоскопических микроскопах «Альтами ПСО 745-Т» и «Stemi2000С».

Микрофрактографический анализ для выявления особенностей микростроения очаговых зон излома и микромеханизмов разрушения выполнен методом растровой электронной микроскопии на приборе JEOL JSM-6480LV. На этом же приборе исследовано микрораспределение

химических элементов в структурных составляющих металла с применением метода микрорентгеноспектрального анализа (луч диаметром ~ 2 мкм, K_{α} -излучение).

Материал, технология изготовления и условия эксплуатации

Штоки гидроцилиндров систем управления рабочим оборудованием выемочно-транспортирующих машин относятся к силовым элементам, работающим при знакопеременных нагрузках в жестких условиях воздействия окружающей среды. Из-за непосредственной близости к рабочим органам машины, запылённости и загрязнённости, абразивного действия заносимых из внешней среды частиц, штоки при эксплуатации подвергаются коррозии и другим повреждениям, а нарушение сплошности рабочей поверхности штоков снижает их прочность, прежде всего усталостную. Поэтому для обеспечения высокой работоспособности применяют различные технологии упрочнения штоков, в том числе электролитическое хромирование. Износостойкие хромовые покрытия позволяют многократно увеличить срок службы деталей при работе на трение, а также дают возможность применять для их изготовления более дешёвые углеродистые стали взамен легированных.

Вместе с тем хромирование может значительно снижать усталостную прочность деталей (в том числе малоцикловую), в частности из-за таких явлений как новодороживание стали и возникновение остаточных напряжений. Наибольшее снижение предела усталости отмечают у закаленных углеродистых сталей, у конструкционных сталей повышенной прочности. В связи с этим для получения качественных покрытий из хрома применяют целый комплекс технологических процессов и специальных мероприятий, включающих предварительную подготовку деталей, нанесение равномерных износостойких покрытий, последующую обработку полученных покрытий, их контроль.

На исследование поступил короткий фрагмент разрушившегося штока гидроцилиндра подъема отвала бульдозера (далее – штока) длиной 310 мм (рис. 1, а). Излом произошел на расстоянии ≈ 256 мм от нижнего торца штока. Диаметр штока $\varnothing 76,15$ мм, исходная длина 1802,3 мм.

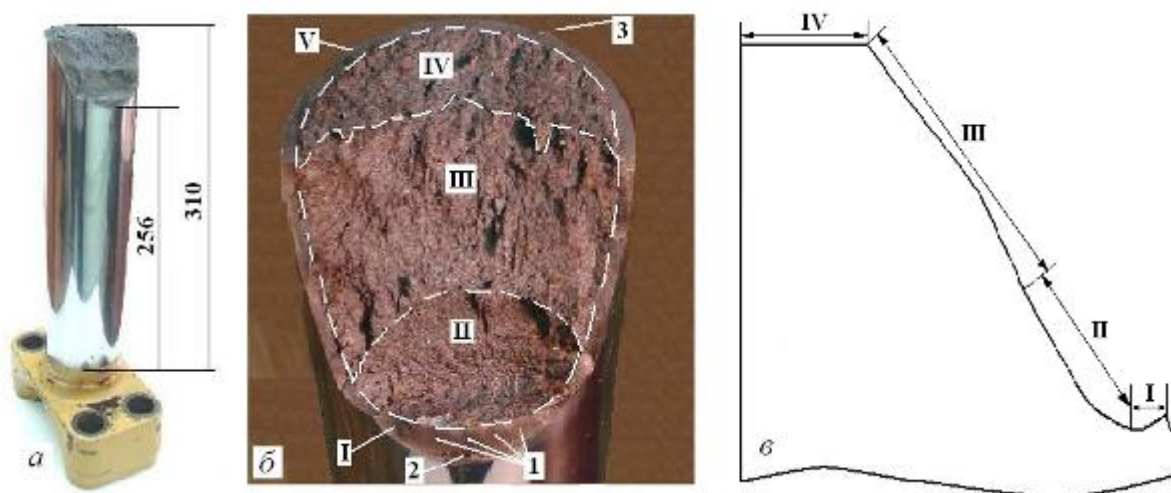


Рисунок 1. Общий вид (а), поверхность разрушения (б) и схема профиля излома (в) короткого фрагмента штока. I, II, III и IV – зоны разрушения; 1 – места зарождения разрушения; 2 – притертые области; 3 – растрескивания от наружной поверхности

По данным спектрального анализа аварийный шток выполнен из углеродистой качественной стали, и после поверхностной закалки упрочнен хромовым покрытием. Толщина хромированного слоя, глубина закаленного слоя и его твердость соответствуют принятым требованиям.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование поверхности излома. Визуальное изучение строения излома выявляет несколько участков, различающихся по виду макрорельефа и шероховатости (рис. 1, б-в). Участок I занимает примерно 10% от общей площади поверхности разрушения и имеет относительно матовую поверхность; более блестящий груборельефный участок IV занимает около 30 %. Поверхности зон II, III также более блестящего кристаллического излома наклонены под углом к поперечному сечению

образца (угол наклона участка II составляет $\approx 60^\circ$, участка III приблизительно 45°), что объясняется резкими изменениями напряженного состояния штока в процессе разрушения.

Очаги разрушения находятся в подповерхностном слое (рис. 1, б, зона I, стрелки 1). Зона I состоит из сглаженных слегка выпуклых площадок и расположена вблизи поверхности штока на глубине ≈ 3 мм. На участках распространения очаговых трещин видны рубцы, возникшие при слиянии соседних трещин; также в зоне I хорошо заметна дугообразная притертость поверхности (2 на рис. 1, б и рис. 2, а), образовавшаяся при трении берегов трещины в промежуток времени от момента ее образования до окончательного разрушения детали. Представляет интерес наличие твердых продуктов смазки в подповерхностной области (2 на рис. 1, б; 3 на рис. 2, а).

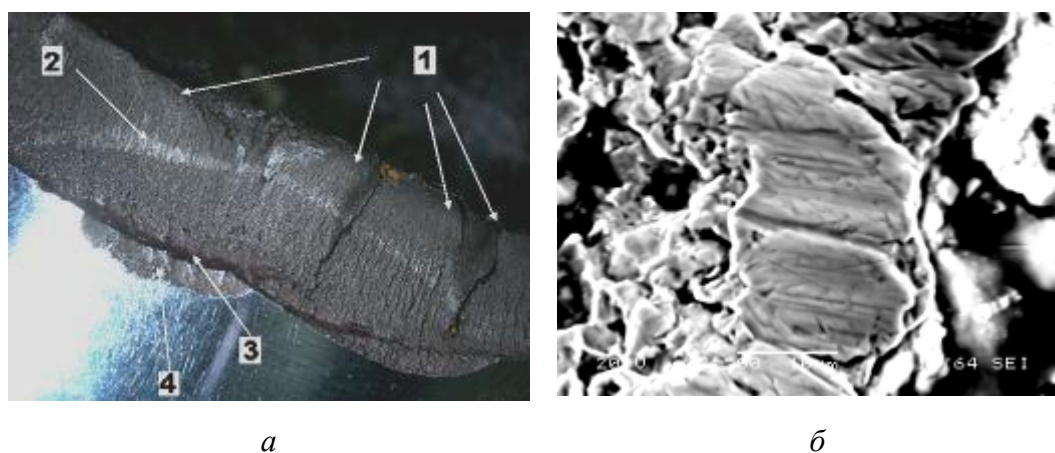


Рисунок 2. Очаговая зона разрушения (а) и площадки с усталостными бороздками (б).
1 – места зарождения разрушения; 2 – притертые области;
3 – затекшая и загустевшая смазка; 4 – откол

Исследование очагов разрушения в электронном микроскопе выявило присутствие на их поверхности множественных округлых неметаллических включений (рис. 3), преимущественно относящихся к кислородсодержащим (по данным микрорентгеноспектрального анализа). Очевидно, что они сыграли значительную роль в зарождении начальных

микротрещин и реализации микромеханизма малоэнергетического зернограницного разрушения (рис. 3, *а*, *в*). Ускоренное развитие разрушения также обусловили хрупкие транскристаллитные сколы (рис. 3, *б-в*).

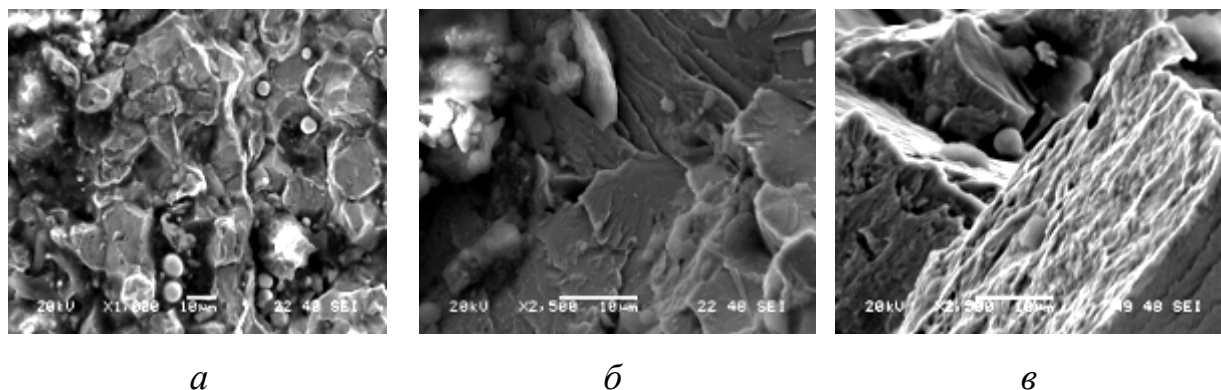


Рисунок 3. Микромеханизмы разрушения штока: *а* – межзеренное растрескивание; *б* - хрупкое разрушение сколом; *в*– межзеренное растрескивание и скол

Образовавшиеся путем растрескивания и сколов начальные несплошности, постепенно развивались в несколько усталостных трещин, сливающихся в единый фронт магистральной трещины с образованием рубцов. Выход магистральной трещины на поверхность ослабил сечение детали, но не до критического уровня. Об этом свидетельствует притирание берегов трещины с образованием дугообразной блестящей поверхности: чем сильнее притертость, тем меньше скорость роста трещины и, соответственно, перегрузка. Об отсутствии перегрузки также говорит небольшая высота рубцов в очаговой зоне.

Уменьшение рабочего сечения штока из-за появления трещины, являющейся также концентратором напряжений и меняющей напряженное состояние детали, с течением времени привело к появлению на противоположной стороне растрескивания от наружной поверхности штока (3 на рис. 1, *б*). Растрескивание распространилось по механизму хрупкого шевронного разрушения, обрамляющего периметр штока в виде

незамкнутого кольца с толщиной, соответствующей глубине закаленного слоя. Далее произошел окончательный хрупкий долом штока по зонам II, III, IV (рис. 1, б-в). Сложный вид излома обусловлен изменениями напряженного состояния в процессе распространения разрушения.

Таким образом, результаты фрактографического анализа излома штока позволяют отнести его к усталостным с хрупким доломом. Инициирование усталостного разрушения происходит на глубине ≈ 3 мм. Такую же толщину имеет зона хрупкого шевронного разрушения. Это позволяет предполагать, что причина разрушения кроется в неудовлетворительном качестве приповерхностного слоя, в связи с чем было проведено подробное исследование микроструктуры поперечного сечения штока.

Исследование микроструктуры и твердость. Травление микрошлифа образца выявляет неравномерное потемнение полированной поверхности, что указывает на различную травимость металла и на его макроструктурную неоднородность. Особенность строения металла вблизи поверхности – наличие хромового покрытия, далее наблюдаются упрочненная на глубину до 3 мм зона, промежуточная зона и зона основного металла (рис. 3, а).

На рис. 3, а виден переходный участок, на котором прослеживается изменение структуры от поверхности к центру вследствие проведения дополнительной упрочняющей обработки поверхности штока до нанесения хромового покрытия. Обычно осуществляется закалка токами высокой частоты (ТВЧ) с последующим нагревом для снятия остаточных напряжений и уменьшения количества водорода в металле (выделяется при хромировании и способствует охрупчиванию). При закалке стараются минимизировать присутствие в упрочненном слое феррита, снижающего его прочность, и добиться преимущественно мартенситной структуры.

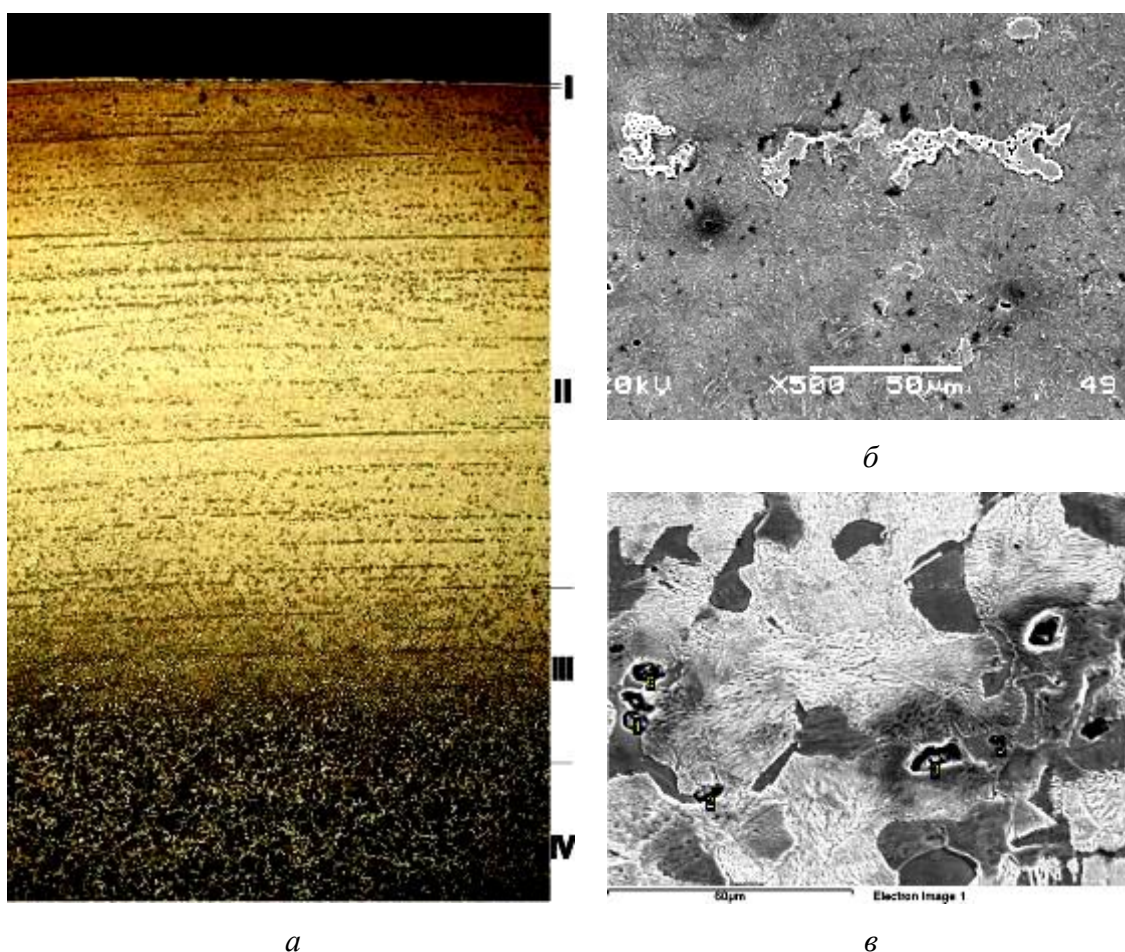


Рисунок 3. Микроструктура штока в поперечном сечении: I- хромовое покрытие; II – упрочненный слой; III – зона перехода; IV - сердцевина (*a*, $\times 50$); микростроение областей со строчечными неоднородностями (*б*, $\times 500$), с неметаллическими включениями (*в*, 1000)

В зоне закалки и в зоне перехода от закаленного слоя к сердцевине металла штока помимо отпущенного мартенсита выявлено наличие структурных дефектов типа ферритной полосчатости (рис. 3, *a*, *б*), снижающих сопротивление зарождению и развитию усталостного разрушения под действием нагрузок при возвратно-поступательном движении детали. Наличие таких структурных дефектов с пониженной прочностью особенно опасно в переходной зоне, что подтверждается зарождением трещин именно в данной области.

Одной из причин появления ферритной полосчатости считают наличие в структуре стали пластичных сульфидных включений. Анализ микроструктуры переходного слоя и сердцевины выявил значительное

количество неметаллических включений различной величины и природы (рис.3, в). По данным микрорентгеноспектральных исследований установлено, что неметаллические включения действительно имеют преимущественно сульфидную, а также кислородную природу (сульфиды марганца, простые окислы, окисульфиды).

Согласно литературным данным, загрязненность сульфидами, их форма и морфология являются одним из наиболее важных факторов, определяющих качество стали с точки зрения ее эксплуатационной надежности [2, 4]. При термообработке мелкие сульфиды могут выделяться по границам зерен аустенита, что часто служит причиной появления межзеренного излома. Кроме того, как уже отмечалось, сульфиды при термообработке могут способствовать возникновению ферритных участков с пониженной прочностью, что особенно опасно при полосчато-строчечной форме таких фаз.

Таким образом, металлографический анализ выявил в структуре упрочненного слоя и переходной зоны от упрочненного слоя к сердцевине множественные участки ферритной полосчатости и множественные неметаллические включения преимущественно сульфидной и кислородной природы.

Выводы

1. Аварийный шток выполнен из углеродистой качественной стали. Для обеспечения служебных свойств штока применена технология гальванического хромирования с предварительной поверхностной закалкой. Толщина хромированного слоя (≈ 20 мкм), глубина упрочненного слоя (≈ 3 мм) и его твердость (56 HRC) соответствуют принятым требованиям.

2. В структуре упрочненного слоя и переходной зоны от упрочненного слоя к сердцевине выявлены множественные участки

ферритной полосчатости и множественные неметаллические включения преимущественно сульфидной и кислородной природы. Структура ферритной полосчатости имеет малую прочность и относится к дефектам закалки.

3. Очаговые микротрещины появились на глубине, соответствующей глубине упрочнения закалкой. Поверхности очагового излома покрыты частицами неметаллических включений; основные микромеханизмы трещинообразования – межзеренное разрушение и транскристаллитный скол. Дальнейшее развитие начальных микротрещин имеет усталостную природу. Распространение магистральной усталостной трещины шло в осевом направлении вдоль переходной зоны.

4. Окончательное разрушение произошло с образованием хрупкого шевронного узора, обрамляющего периметр штока в виде незамкнутого кольца с толщиной, соответствующей глубине закаленного слоя. Остальная часть долома также образовалась по механизму хрупкого разрушения. Сложный вид излома обусловлен изменениями напряженного состояния в процессе распространения разрушения.

5. Основная причина поломки штока – недостаточное сопротивление металла трещинообразованию и усталостному разрушению из-за наличия структурных дефектов в зоне закалки и в зоне перехода от закаленного слоя к сердцевине: первоначальные растрескивания инициированы ферритной полосчатостью и неметаллическими включениями; их присутствие обеспечило избирательное развитие усталостной трещины в осевом направлении внутри штока вдоль переходного слоя.

6. Анализ строения и особенностей поверхности эксплуатационного излома штока позволяет исключить в качестве причины его аварийной поломки воздействие однократной нагрузки. Основным механизмом разрушения – развивающаяся во времени усталость металла.

В качестве заключения можно отметить, что по результатам проведенных исследований поставщик произвел предприятию, эксплуатирующему бульдозер, безвозмездную замену разрушившейся детали.

Список литературы

1. Фрактография и атлас фрактограмм / Под ред. Дж. Феллоуза. М.: Металлургия, 1982. 482 с.
2. Ботвина Л.Р. Кинетика разрушения конструкционных материалов. М.: Наука, 1989. 230 с.
3. Мак-Ивили А. Дж. Анализ аварийных разрушений. М.: Техносфера, 2010. 416с.
4. Гордеева Т.А., Жегина И.П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. М.: Машиностроение. 1978. 200с.

References

1. Fraktografija i atlas fraktogramm / Pod red. Dzh. Fellouza. M.: Metallurgija, 1982. 482 s.
2. Botvina L.R. Kinetika razrushenija konstrukcionnyh materialov. M.: Nauka, 1989. 230 s.
3. Mak-Ivili A. Dzh. Analiz avarijnyh razrushenij. M.: Tehnosfera, 2010. 416s.
4. Gordeeva T.A., Zhegina I.P. Analiz izlomov pri ocenke nadezhnosti materialov. M.: Mashinostroenie. 1978. 200s.