

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ
МАТЕРИАЛА ОТКЛЮЧАЮЩИХ ПРУЖИН
ШКАФНОГО ПРИВОДА ОТДЕЛИТЕЛЯ**

Д. М. Мордасов¹, Ю. Г. Фатеев²

Кафедра «Материалы и технология», ФГБОУ ВПО «ТГТУ» (1);

ООО «Инженерный центр «Диагност-Т», г. Тамбов (2);

mit@mail.nnn.tstu.ru

Ключевые слова: задир; макроструктура; микроструктура; пружина; усталостный излом; усталость материала.

Аннотация: Проведены исследования микро- и макроструктуры разрушенных пружин, их химического состава и механических свойств. Определены причины разрушения отключающих пружин модернизированного шкафного привода отделителя. Даны рекомендации по предотвращению возникновения подобных аварийных ситуаций.

Пружины, работающие под нагрузкой в течение длительного времени, а также в тяжелых условиях динамического нагружения, снижают свою несущую способность. Одним из основных эксплуатационных требований, предъявляемых к таким пружинам, является требование высокой выносливости.

Вопросы усталостной прочности пружин и других упругих элементов становятся особенно важными в связи с работами по повышению надежности и точности машин и механизмов. Разрушение пружины от усталости происходит вследствие многократного изменения напряжений и связано с местными пластическими деформациями в отдельных слабых микрообъемах (зернах). При высоких напряжениях и большом числе их повторений на поверхности пружины возникает трещина, распространяющаяся по сечению витка и приводящая к поломке.

Большинство конструкций цилиндрических пружин растяжения-сжатия работает при циклических нагрузках с различным коэффициентом асимметрии, и очень часто подвергается ударной нагрузке. Наибольшее число колебаний, выдерживаемых пружиной до разрушения, зависит не только от максимального напряжения, но и амплитуды самих колебаний: чем больше амплитуда колебаний при данном максимальном напряжении, тем меньшее число циклов выдерживают пружины.

На основании технически правильного заключения о причинах возникновения повреждений следует принимать немедленные меры, которые могут застраховать дефектный узел от аварии. Для автоматического отключения поврежденных участков высоковольтных (до 220 кВ) электрических цепей применяются шкафные приводы отключающие модернизированные (ШПОМ), управляющие отделителями и осуществляющие автоматическое отключение посредством пружин при срабаты-

вании блокирующего реле или отключающего электромагнита.

При проведении экспериментов исследованы разрушенные пружины ШПОМ, характерный излом которых представлен на рис. 1. На левой концевой части пружины (см. рис. 1, *a*) имеется излом, не позволяющий эксплуатировать ее по назначению. На оставшемся отрезке концевой части пружины, с его внутренней стороны, имеются задиры (см. рис. 1, *б*).

В целях выявления возможных причин разрушения пружины из-за несоответствия химического состава ее материала проведен спектральный анализ. Ниже представлены результаты спектрального анализа стали, из которой изготовлена пружина, полученные на спектрометре Bruker (%): С – 0,74; Si – 0,29; Mn – 0,31; N – 0,15; S – 0,025; P – 0,014; Cr – 0,12; Mo – 0,018; Al – 0,05. По большинству признаков (соответствий) полученный химический состав можно отнести к стали 75, химический состав которой по ГОСТ 14959–79 (%): С – 0,62...0,7; Si – 0,17...0,37; Mn – 0,9...1,2; Ni – до 0,25; S – до 0,035; P – до 0,035; Cr – до 0,25.

Анализ результатов спектрального анализа показывает, что большая часть регламентируемых ГОСТ элементов (кремний, сера, фосфор, хром) находятся внутри разрешенных (рекомендуемых) интервалов. Исключение составляют: углерод – 0,74 % (при регламентируемом интервале 0,62...0,7 %); наличие азота в количестве 0,15 %; молибдена – в небольшом количестве – 0,018 %; алюминия, содержание которого не предусмотрено ГОСТ – 0,05 %.

Содержание молибдена связано со случайными факторами (использование для выплавки промышленного возврата с повышенным содержанием молибдена) и, в целом, оказывается благоприятным, но малозначимым фактором.

Присутствие алюминия обусловлено использованием его при раскислении в повышенном количестве вместо марганца. Наличие одновременно в стали алюминия и азота (0,15 %) может оказывать существенное влияние на структуру и свойства. С одной стороны, это приводит к образованию дисперсных нитридов алюминия AlN, располагающихся на границах аустенитного зерна и сдерживающих его рост при отжиге или закалке (наследственная мелкозернистость – благоприятный фактор). С другой стороны, нитриды алюминия являются причиной повышения локальной концентрации напряжений на границах, косвенно способствуют образованию и накоплению дефектов, которые повышают вероятность усталостного разрушения. Сведений прямого влияния нитридов на усталость не обнаружено.

Часть присутствующего в стали азота находится в растворенном состоянии, выделяется при 300...400 °С в местах дефектов при термообработке, повышает в этих местах давление и в больших сечениях вызывает образование локальных трещин (флокенов). Влияние этого фактора в малых сечениях минимально и как косвенный фактор может учитываться.

Наиболее информативными при установлении причин разрушения материалов являются результаты фракто- и металлографических исследований. Микроструктура материала пружины изучалась при увеличениях ($\times 100... \times 500$) на металлографическом ММР-2Р и цифровом DigiMicro 2.0 микроскопах.

Подготовка образцов для исследования включала следующие этапы:

– шлифование и полирование исследуемых поверхностей;

– травление подготовленных поверхностей 5%-м раствором азотной кислоты в этиловом спирте.

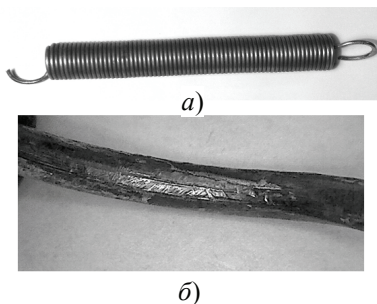


Рис. 1. Пружина привода ШПОМ:
a – общий вид разрушенной пружины; *б* – задиры на концевой части

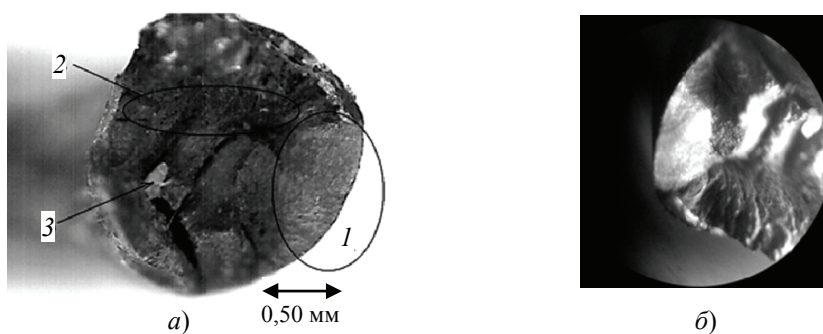


Рис. 2. Поверхность разрушения:

а – цифровой микроскоп ($\times 210$): 1 – участок неглубокого рельефа; 2 – участок глубокого рельефа; 3 – инородное привнесенное позже включение (силикат);
б – бинокулярный микроскоп ($\times 190$)

Исследования проводились на установление соответствия требованиям ГОСТ 14959–79 следующих характеристик:

- величина аустенитного зерна не крупнее 5 номера по ГОСТ 5639–82;
- наличие неметаллических включений в материале по ГОСТ 1778–70 (метод Ш1 или Ш4).

Исследовалась также микроструктура материала пружины.

Образец для металлографии вырезан из центральной (по длине) части пружины в виде кольца. Микрошлиф готовился в продольной плоскости образца после снятия поверхностного слоя (0,4...0,5 мм). На рисунке 2 показана поверхность разрушения. Характерной особенностью является наличие округлых включений на однородном фоне, что интерпретируется как ферритно-цементитная смесь, соответствующая по форме и дисперсности зернистому трооститу. Зернистая структура свидетельствует о термообработке пружины, включающей закалку и отпуск до температуры 450...500 °С.

При исследовании микроструктуры выявлены также неметаллические включения (бальность 1 по оксидам, сульфидам и нитридам), аустенитное зерно (номер 5), что находится в допускаемых пределах. Фрактографические исследования (исследование поверхности разрушения) при визуальном осмотре показали неоднородность разрушения, выражающуюся в глубоком рельефе (перепад вершины и впадины 1,0...1,5 мм). Отмечен различный тип разрушения.

Большая часть поверхностей разрушения располагается под углом 60...70° относительно осевой линии, имеет характерный волокнистый излом, что свидетельствует о высокой работе разрушения (высокое сопротивление распространению трещины). На нескольких участках излома отмечается неглубокий рельеф, а поверхность этих участков располагается под углом порядка 40...60° к осевой.

На рисунке 2 участок 1 с мелким рельефом занимает около четверти сечения проволоки, имеет матовый цвет и частично окислен, контуры рельефа имеют округлую форму, характерную для поверхностей, образующихся при распространении усталостных трещин. Участок усталостного разрушения показан в другом ракурсе (рис. 3) и с большим увеличением ($\times 250$), позволяющем зафиксировать другой такой же характерный участок 2, что фактически свидетельствует о множественности очагов начала усталостного разрушения.

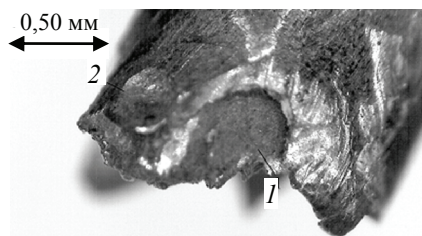


Рис. 3. Поверхность усталостного разрушения:
 1, 2 – участки разрушения

Наличие в структуре излома областей, имеющих гладкую, притертую поверхность (светлые участки на микрофотографиях), и областей, имеющих крупнозернистую структуру (более темные участки на мик-

рофотографиях), говорит об усталостном характере излома. При этом гладкие участки, представляющие собой зону распространения усталостной трещины, образовались в результате взаимного трения и наклепа от периодически контактирующих поверхностей раскрывающейся и схлопывающейся трещины; участки с глубоким рельефом, возникшие в результате «доллома» детали, есть результат вязкого разрушения из-за повышенного напряженного состояния на поверхности трещины.

Полученные результаты полностью согласуются с современными представлениями о механизме усталостного разрушения деталей машин и механизмов [1 – 3].

Пружинные стали закаливают и отпускают до значения 42...45 HRC. С целью определения качества термической обработки пружин на этапе их производства проведены механические испытания. Измерения твердости проводились на неразрушенной концевой части пружины прибором ТК-2. На рисунке 4 стрелками показаны места измерений твердости.

В результате измерений и статистической обработки результатов получено значение твердости (42 ± 1) HRC, что соответствует требованиям, предъявляемым к пружинам, и твердости материала со структурой троостита, полученной после закалки и отпуска на 400...500 °С.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о том, что наиболее вероятной причиной разрушения концевой части пружины ШПОМ является усталость материала, выражающаяся в накоплении поврежденных субмикронного размера в виде облаков дислокаций с последующим формированием в них микронных дефектов, объединяющихся в более крупные несплошности – единичные микротрещины и сетки микротрещин. Инструментальное обнаружение усталостной дефектности затруднительно и мало используется на практике. Чаще используются натурные испытания изделий после длительной эксплуатации. К сопутствующим нерегламентируемым факторам относятся: наличие в составе материала повышенного содержания азота и алюминия, благоприятствующие повышению предела текучести и эксплуатационных качеств изделия в краткосрочном и среднесрочном временном интервале, но непредсказуемо влияющих при длительных сроках эксплуатации.

Список литературы

1. Терентьев, В. Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов / В. Ф. Терентьев. – М. : Интермет Инжиниринг, 2002. – 289 с.
2. Богатов, А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов / А. А. Богатов. – Екатеринбург : Изд-во ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2002. – 329 с.
3. Легостаев, В. Л. Методика расчета шатунов кривошипно-шатунных приводов перемещения верхних полуформ форматоров-вулканизаторов пневматических автопокрышек / В. Л. Легостаев, Е. Д. Мордовин // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 2. – С. 548 – 555.



Рис. 4. Места измерения твердости материала

A Study of the Structure and Properties of Opening Springs Material for Cabinet Type Separator Drive

D. M. Mordasov¹, Yu. G. Fateev²

*Department of Materials and Technologies, TSTU (1);
Engineering Center "Diagnost-T", Tambov (2); mit@mail.nnn.tstu.ru*

Keywords: fatigue fracture; macrostructure; material fatigue; microstructure; spring; scuffing.

Abstract: We conducted the studies of micro- and macrostructure of destroyed springs and investigated their chemical composition, mechanical and magnetic properties. The causes of destruction of opening springs for the upgraded cabinet type separator drive. Recommendations on preventing the occurrence of similar accidents were made.

References

1. Terent'ev V.F. *Ustalostnaya prochnost' metallov i splavov* (The fatigue strength of metals and alloys), Moscow: Intermet Inzhiniring, 2002, 289 p.

2. Bogatov A.A. *Mekhanicheskie svoystva i modeli razrusheniya metallov* (The mechanical properties and fracture of metals model), Ekaterinburg: GOU VPO UGTU-UPI, 2002, 329 p.

3. Legostaev V.L., Mordovin E.D. *Transactions of Tambov State Technical University*, 2004, vol. 10, no. 2, pp. 548-555.

Forschungen der Struktur und der Eigenschaften des Materials der abschaltenden Federn des Schrankantriebes des Scheiders

Zusammenfassung: Es sind die Forschungen der Mikro- und Makrostrukturen der zerstörten Federn durchgeführt, es ist ihre chemische Verbindung und die mechanischen Eigenschaften untersucht. Es sind die Gründe der Zerstörung der abschaltenden Federn des modernisierten Schrankantriebes des Scheiders bestimmt. Es sind die Empfehlungen nach der Verhinderung des Entstehens der ähnlichen Notfälle gegeben.

Etude de la structure et des propriétés du matériel des ressorts débranchants de la transmission d'armoire du séparateur

Résumé: Sont effectuées les études de micro – et macrostructure des ressorts détruits; est étudiée leur composition chimique et les propriétés mécaniques. Sont définies les raisons de la destruction des ressorts débranchants de la transmission d'armoire du séparateur. Sont données les recommandations pour prévenir l'apparition de ces situations d'urgence.

Авторы: *Мордасов Денис Михайлович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материалы и технология», ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; *Фатеев Юрий Геннадьевич* – технический директор, ООО «Инженерный центр «Диагност-Т», г. Тамбов.

Рецензент: *Немтинов Владимир Алексеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».