

УДК 669.1.017

В.Б. Григоренко¹, Л.В. Морозова¹

ПРИМЕНЕНИЕ ФРАКТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-98-111

Исследованы и установлены причины разрушения изделий из среднеуглеродистых сталей (сталь 60, сталь 55 и сталь 51ХФА). Установлено, что основной материал изделий (тросов и пружин) отвечал требованиям нормативной документации по составу, структуре и содержанию неметаллических включений. Разрушения были вызваны действием напряжений, превышающих допустимые (в первом и третьем случае). Показаны отличия в строении изломов, полученных в результате воздействия комплексной статической нагрузки и циклических нагрузок, как при небольших, так и при повышенных уровнях напряжений.

Ключевые слова: среднеуглеродистая сталь, фраттография, растровая электронная микроскопия, зернограницное хрупкое и усталостное разрушение.

V.B. Grigorenko¹, L.V. Morozova¹

THE USAGE OF FRACTOGRAPHIC ANALYSIS TO DIAGNOSTIC THE CAUSES OF DESTRUCTION OF PRODUCTS FROM MEDIUM-CARBON STEEL

The reasons of destruction of products from medium-carbon steels (steel 60, steel 55 and steel 51HFA) are investigated and established. It was established that the main material of the products (cables and springs) met the requirements of the normative documentation on the composition, structure and content of non-metallic inclusions. The destructions were caused by the action of stresses exceeding the permissible (in the first and third cases). Differences in the structure of the breaks, obtained from the action of complex static load and cyclic loads, both at low tension levels and at elevated ones are shown.

Keywords: constructional steel, fractography, scanning electronic microscopy, fatigue failure, intercrystalline brittleness.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Длительность периода эксплуатации сложных технических систем (СТС) зависит от свойств материалов и точности изготовления входящих в СТС узлов и деталей, что в свою очередь определяется качеством исходных материалов [1–3].

Для изготовления канатной проволоки и пружин общего назначения применяют стали похожих составов (углеродистые конструкционные с содержанием углерода от 0,5 до 1% (по массе)), такие как стали марок 50, 55, 60, 65 и обладающие большей прокаливаемостью низколегированные стали, например марок 60Г, 55С2А, 51ХФА, 55ХГР, 60С2Н2А и др. [4].

Требуемые свойства для проволоки и пружин в соответствии с назначением неодинаковы, поэтому эти свойства достигаются путем различной термической и термомеханической обработки.

Для изготовления проволоки, применяемой в стальных канатах и тросах, наиболее часто используют процесс патентирования, который позволяет создать в углеродистой стали структуру, способную к холодной пластической деформации с большими обжатиями без обрывов. При данной обработке после операции холодного волочения проводят аустенизацию полуфабриката проволоки при температурах $\sim 900^\circ\text{C}$ и изотермическую обработку с выдержкой в соляных или свинцовых ваннах при температуре $450\text{--}550^\circ\text{C}$ с последующим волочением. В результате изотермического распада образуется тонкопластинчатый сорбит (квазиэвтектоид) при отсутствии выделений избыточных фаз (феррита или цементита в зависимости от содержания углерода). В процессе пластической деформации цементитные пластины вытягиваются вдоль оси волочения и утончаются, а в ферритных прослойках возникает высокая плотность дислокаций и формируется ячеистая структура. После патентирования с последующим волочением прочность проволоки из углеродистой стали может достигать $1500\text{--}2000$ МПа, что и требуется для таких изделий, как канаты.

Область применения стальных канатов очень широка, в авиации же наиболее часто применяют канаты (тросы) небольшого сечения в системах управления самолетов. Конструкции канатов могут содержать одну или несколько прядей, а сами пряди свивают из проволок одинакового (нормальная структура сечения) или разного диаметра (комбинированная структура сечения), причем на поверхности каната располагаются проволоки большего диаметра. В соответствии с ГОСТ 7372–79 [5] допускается изготовление проволоки из углеродистой стали по ГОСТ 1050–2013 [6] или ГОСТ 14959–2016 [7], возможно применение проволоки как без покрытия, так и с цинковым покрытием разной плотности [8]. Проволока для авиационных канатов изготавливается из катанки марок 50, 55, 60 и 65 по выбору предприятия-изготовителя [9].

В процессе изготовления пружин необходимо обеспечить высокое сопротивление материала малым пластическим деформациям при кратковременном (предел упругости) и длительном нагружении (релаксационная стойкость) [10, 11]. К пружинным сплавам общего назначения относятся преимущественно углеродистые и низколегированные стали перлитного класса, которые упрочняются в результате холодной пластической деформации или при закалке с мартенситным превращением.

В зависимости от размеров и конфигурации упругих элементов с учетом экономичности технологических процессов для изготовления пружин применяют патентованную или закаленную и отпущенную до заданной прочности проволоку.

Патентованная проволока после заключительной пластической деформации имеет значительные внутренние напряжения, заметно снижающие предел упругости. Для повышения предела упругости и релаксационной стойкости, после навивки пружины подвергают низкотемпературному отпуску при $200\text{--}300^\circ\text{C}$.

При изготовлении пружин большого сечения трудно получить равномерное обжатие с большими степенями деформации, как при патентировании, поэтому используют закалку с последующим отпуском на заданную твердость. При этом предпочтительно применение легированных сталей, позволяющих получать оптимальное сочетание прочностных свойств с высокой вязкостью и сопротивлением хрупкому разрушению. Положительным качеством является и технологичность легированных сталей, что проявляется в меньшей склонности к трещинообразованию и короблению при закалке. Оптимальная твердость пружин после закалки и отпуска находится в пределах $42\text{--}48$ HRC. При более высокой твердости возрастает склонность стали к замедленному и хрупкому разрушению.

Несмотря на сходство сталей для канатов и пружин по составу, отличающиеся технологии производства и различные условия работы изделий приводят к образованию при разрушении значительно отличающихся изломов [12–14]. В данном исследовании с применением растровой электронной микроскопии [15] установлены причины разрушений тросов и пружин, а также рассмотрены особенности строения изломов, полученных в результате воздействия различных видов нагружения.

Работа выполнена в рамках развития критической технологии 21. «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» из перечня Критических технологий РФ, утвержденного указом Президента РФ от 07.06.2011 г. №899.

Материалы и методы

При исследовании причин разрушения тросов и пружин проводили анализ технической документации, внешний осмотр, фрактографический анализ в местах разрушения, анализ микроструктуры, химического состава и механических свойств материалов.

Исследование химического состава материалов выполнили методом инфракрасно-абсорбционной спектроскопии на приборе LECO CS-600 и атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой на приборе Varian 730 ES по ГОСТ 22536.0–ГОСТ 22536.9.

Испытания тросов и отдельных проволок на растяжение проводили на электро-механической испытательной машине Zwick/Roell Z100 с максимальным усилием ± 100 кН в соответствии с требованиями ГОСТ 2172–80. Испытания на износ пружин в сочленении проводили в течение 900 ч.

Фрактографические и металлографические исследования разрушившихся образцов и изделий выполнены на растровом электронном микроскопе (РЭМ) JSM-6490LV с приставкой для рентгеноспектрального микроанализа INCA x-sight, на оптических микроскопах Leica DMIRM и Olympus GX51F при увеличениях $\times(100–1000)$. Микроструктуру образцов выявляли травлением в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты.

Результаты

Исследование стального каната 19,5-ГЛ-В-Л-Н-Р-Т-1670

На исследование поступил стальной канат диаметром 19,5 мм и длиной 20 м в виде двух фрагментов – наконечник и обруб троса. Разрушение каната произошло при транспортировке груза массой ~3200 кг на внешней подвеске вертолета.

В соответствии с маркировкой по ГОСТ 2688–80, канат 19,5-ГЛ-В-Л-Н-Р-Т-1670 предназначен для транспортировки людей и грузов (ГЛ), обыкновенного качества (В), левосторонней свивки (Л), по способу свивки – нераскручивающийся (Н), по степени уравновешенности – рихтованный (Р), по точности изготовления – повышенной точности (Т). Грузоподъемность – не более 4000 кгс (по паспорту).

Установлено, что по химическому составу проволока троса соответствует стали 60 по ГОСТ 1050–2013.

Внешний осмотр показал, что трос состоит из шести прядей по 19 проволок в каждой и органического сердечника, а разрушение произошло с разрывом проволок у наконечника и расплетением прядей (рис. 1).

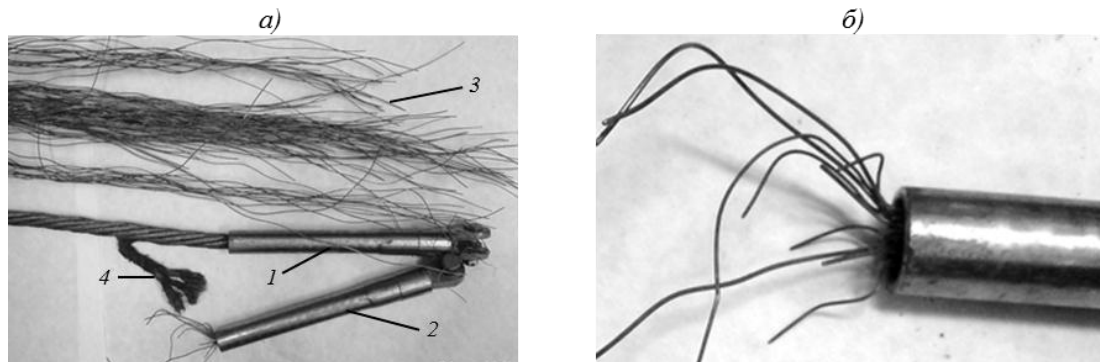


Рис. 1. Вид разрушенного троса:

а: 1 – наконечник (у вертолета); 2 – наконечник с оборванными проволоками; 3 – отделившиеся проволоки; 4 – органический сердечник; б – наконечник с разрушенными проволоками

Для установления качества закрепления каната в наконечнике сделали поперечные разрезы на различном расстоянии от края наконечника с отверстием под болт (рис. 2). Разрезку проводили при помощи режущего диска шириной 3,5 мм. Разрез по сечению *а* сделан на расстоянии 130 мм от края наконечника, разрез по сечению *б* – на расстоянии 212 мм, разрез по сечению *в* – на расстоянии 247 мм.

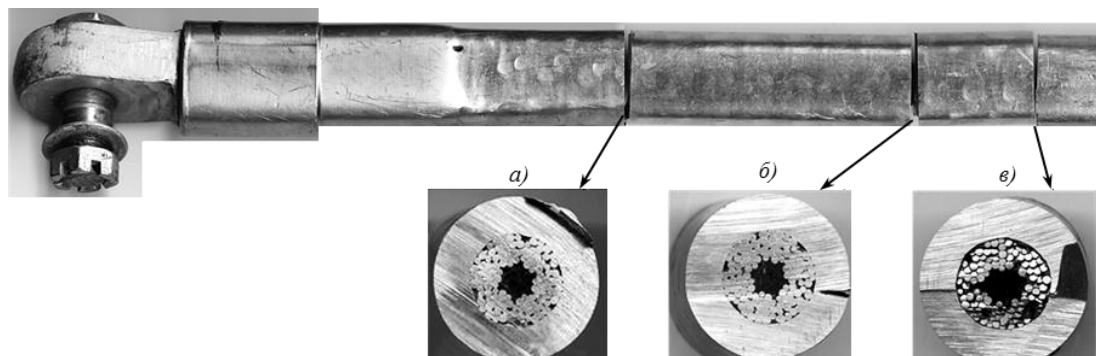


Рис. 2. Общий вид разрезанного наконечника каната и вид сечений соответственно

На рис. 2 видна плотность расположения проволок в запрессовке с обеих сторон реза. В сечении *а* наблюдается плотное распределение проволок и прядей, в сечении *б* изменений в расположении проволок не наблюдается, а в сечении *в* со стороны края наконечника с отверстием под болт наблюдается незначительное «разрыхление» между проволоками, а также отсутствие нескольких проволок, которые оторвались в процессе эксплуатации. Основное разрушение проволок произошло на расстоянии ~15 мм от торца наконечника, девять проволок разрушились на расстоянии 5–40 мм выше торца наконечника.

В результате замеров диаметра проволок установлено, что проволоки в разных прядях имеют отличающиеся диаметры, причем проволоки диаметром 1,04–1,13 мм присутствуют в разных прядях в количестве 4–7 шт.

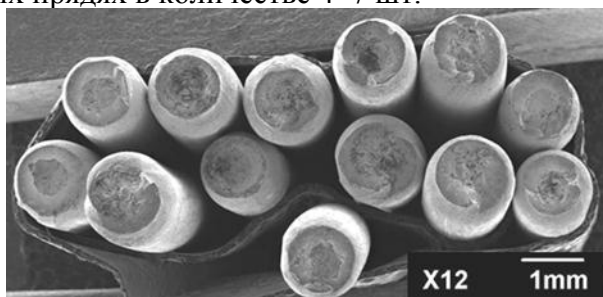


Рис. 3. Общий вид изломов проволок в прядях наконечника каната

На оптическом и электронном растровом микроскопах изучено 96 изломов проволок. Характерный вид изломов показан на рис. 3 и 4. В результате осмотра получены следующие результаты:

- разрушение проволок произошло при действии статической нагрузки, признаки усталостного разрушения, длительного износа и коррозионных повреждений отсутствуют;
- подавляющее большинство проволок разрушилось после значительной деформации с формированием излома со следами кручения (рис. 4). Следы кручения наблюдаются и на поверхности проволок вблизи излома в виде грубых и тонких линий и фрагментации цинкового покрытия (рис. 5).

На пяти проволоках обнаружены вмятины, на одной – подрез. Разрушение в области вмятины произошло с формированием прямого излома по типу среза, без следов пластической деформации у поверхности (рис. 6). Рентгеноспектральным микроанализом установлено, что во вмятинах присутствует цинковое покрытие, которое практически отсутствует на подрезах.

Во всех остальных случаях разрушение как тонких, так и толстых проволок проходило по механизму вязкого ямочного разрыва (рис. 7).

Микроструктуру исследовали на продольных шлифах, изготовленных из отдельных проволок. При анализе нетравленных шлифов обнаружены участки с локальным повреждением цинкового покрытия (рис. 8). Загрязненность стали неметаллическими включениями (оксидами) не превышает 2 балла по ГОСТ 1778–70.

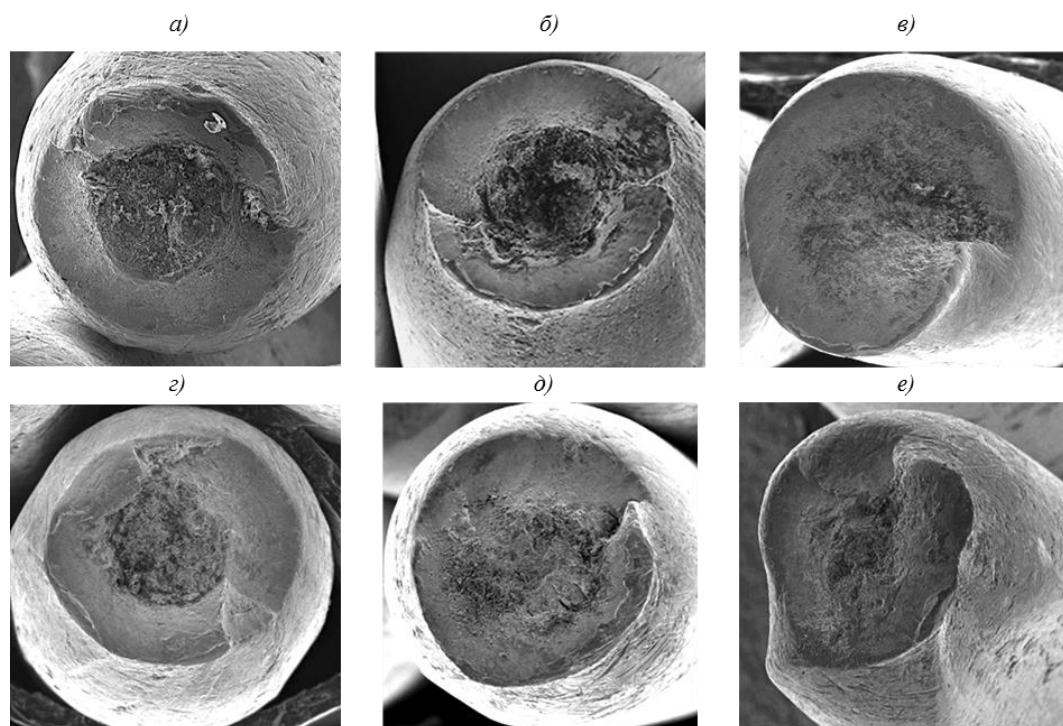


Рис. 4. Характерный вид изломов проволок ($\times 50$)

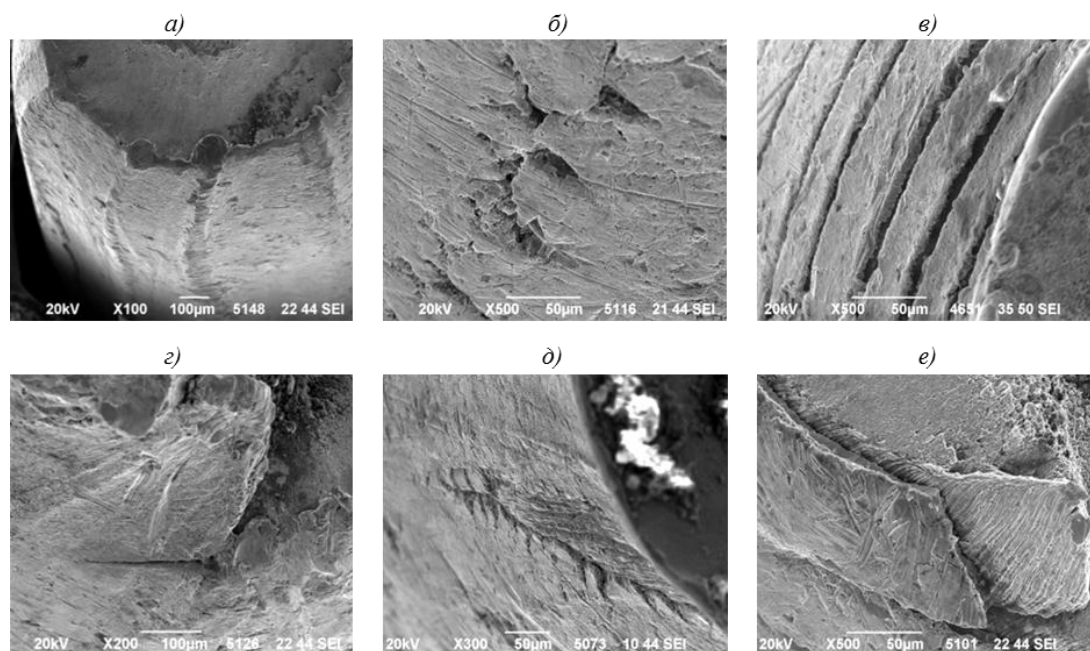


Рис. 5. Вид поверхности проволок у изломов

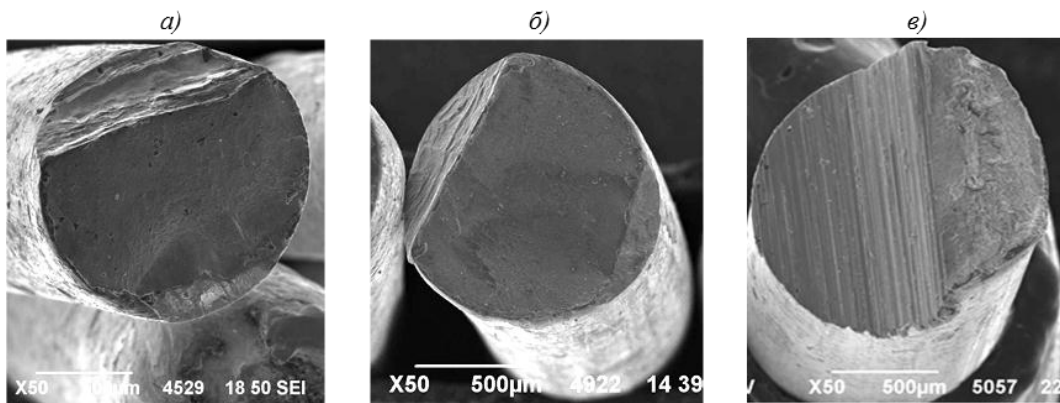


Рис. 6. Вид изломов проволок без следов пластической деформации

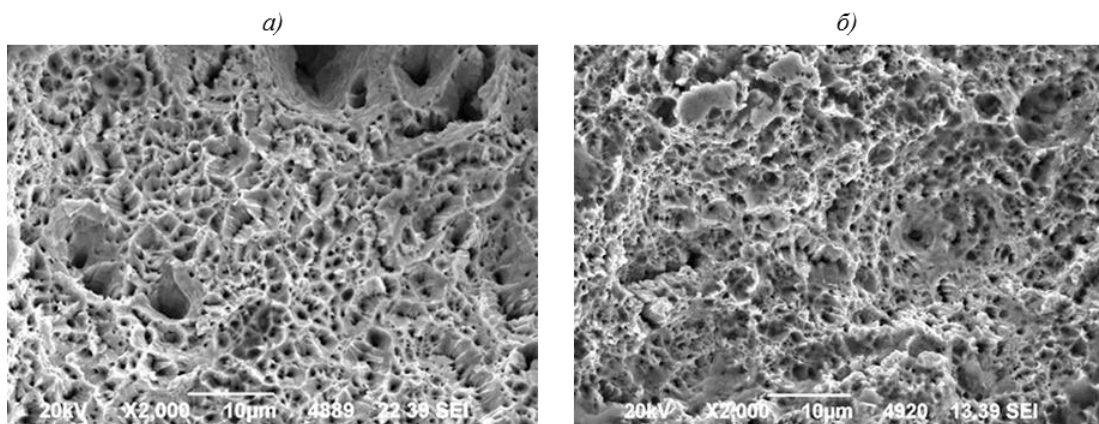


Рис. 7. Характерное микростроение изломов проволок

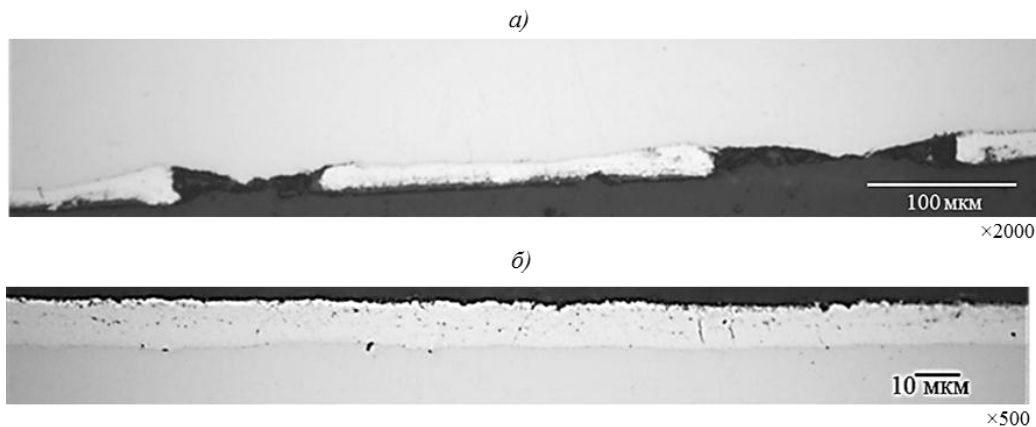


Рис. 8. Строение цинкового покрытия

Микроструктура образцов после травления – высокодисперсный сорбит. Твердость стали, определенная на продольных шлифах, составляет $HV=565-572$, что приблизительно соответствует пределу прочности $\sim 1850-1900$ МПа.

Для определения механических свойств материала каната проведены испытания на растяжение: 19 проволок длиной 200 мм и диаметром 1,05–1,40 мм, составляющих прядь диаметром 6,1 мм; испытания трех прядей диаметром 6,1 мм, а также испытание фрагмента каната длиной 0,9 м.

Установлено, что нагрузка до разрушения отрезка каната длиной 0,9 м составила 170 кН. При испытании прядей диаметром 6,1 мм нагрузка до разрушения в среднем

составила $44 \pm 0,10$ кН, а предел прочности отдельных проволок находится на уровне 1860 ± 35 МПа, что хорошо согласуется с результатами оценки прочности.

После разрушения материала каната при испытаниях проведены исследования полученных изломов. Фрактографический анализ показал, что:

– разрушение проволоки из испытанных прядей происходило с формированием излома по типу «чашка–конус» (рис. 9, а–в). Следов трения на поверхности излома не наблюдается, однако имеются следы кручения в виде ребер и слабых линий и надрывов в покрытии вдоль проволоки, также наблюдаются следы сдавливания проволок (рис. 9, г–з). Эти повреждения могли возникнуть как при испытании, так и в процессе эксплуатации. Излом в центральной части имеет ямочное строение (рис. 9, и);

– разрушение отдельных проволок, испытанных на растяжение, также произошло с формированием излома по типу «чашка–конус», характерного для разрушения высокопрочных круглых образцов при растяжении (рис. 9, и). На поверхности излома следов кручения не наблюдается, однако на поверхности проволоки видны следы кручения в виде полос и ребер. Наличие ребер часто определяет место поворота поверхности конусной части излома.

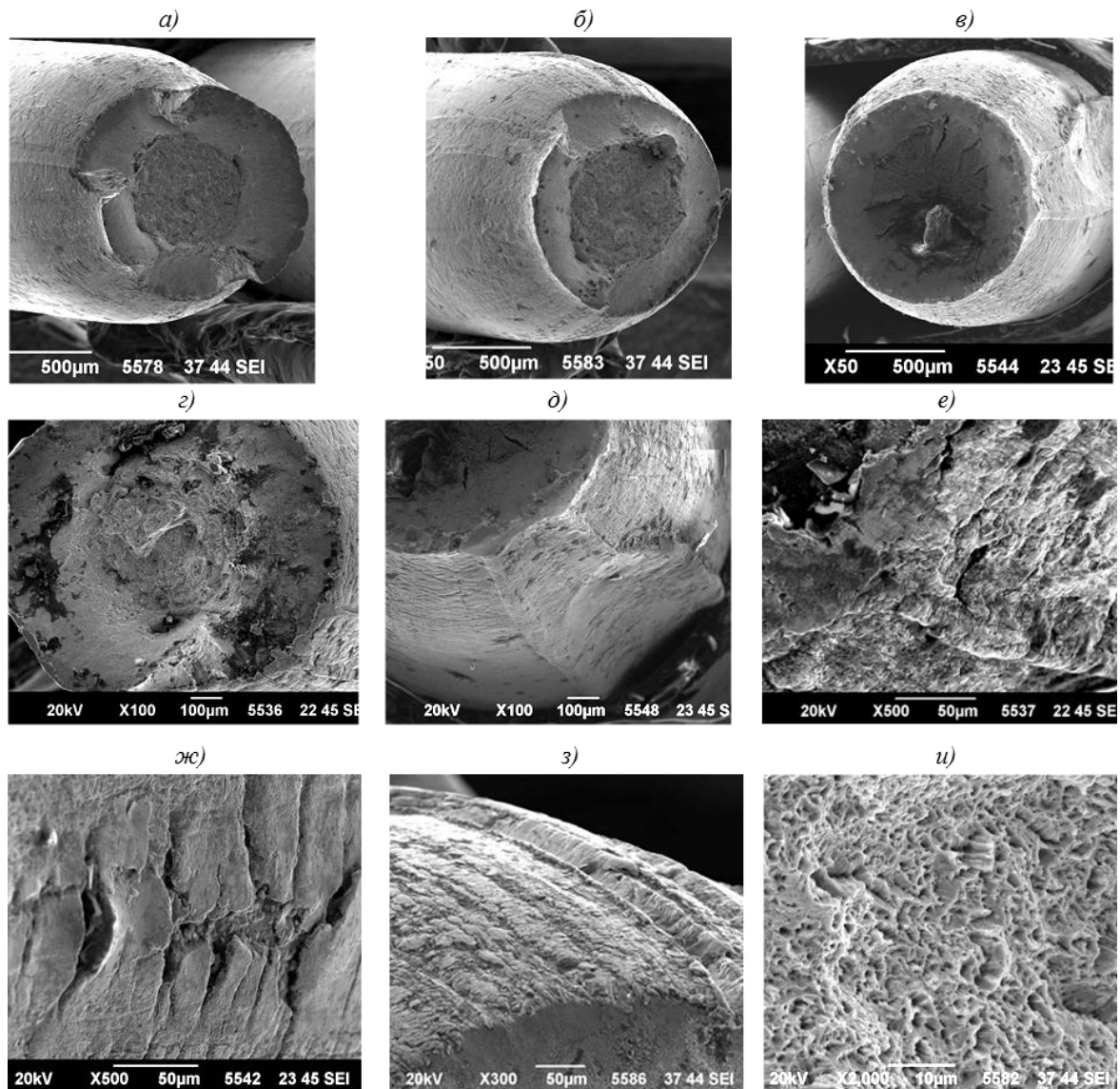


Рис. 9. Характерный вид изломов и поверхности разрушенных при испытаниях на растяжение проволок

На основании сопоставления изломов, полученных при испытании проволок и прядей, и изломов, полученных в процессе эксплуатации, можно отметить следующее:

– в изломах, полученных после испытания как проволок, так и прядей, следов кручения не наблюдается; в изломах, полученных в процессе эксплуатации, четко наблюдаются следы кручения;

– на поверхности проволок, испытанных как в прядях, так и по отдельности, наблюдаются следы кручения, которые могли образоваться при изготовлении троса и в процессе эксплуатации. Наиболее четко эти следы наблюдаются на поверхности проволок, разрушившихся в процессе эксплуатации, фрагментация покрытия (нарушение целостности) в них развита значительно более сильно.

Исследование стального троса ножного управления

При профилактическом осмотре системы управления вертолетом обнаружено повреждение троса ножного управления. После наработки в течение 140 ч на тросе обнаружены обрывы отдельных проволок. Исследования проводили для установления характера разрушения проволок.

При визуальном осмотре троса на расстоянии ~2,1 м от ушкового наконечника выявлены обрывы отдельных проволок. Диаметр каната троса составляет $4,0 \pm 0,1$ мм. На тросе имеются следы смазки темного цвета. Внешний вид троса и участка с обрывом четырех проволок приведен на рис. 10, стрелками отмечены места обрыва отдельных проволок. Обрыв проволок произошел в разных витках троса, по одной проволоке на виток.



Рис. 10. Общий вид троса и дефектной области

По результатам химического анализа установлено, что материал троса соответствует стали 55 по ГОСТ 1050–2013. Проведенные испытания на растяжение троса ножного управления показали, что разрывное усилие составляет 12745 Н/мм^2 (1300 кгс/мм^2) и соответствует требованиям ГОСТ 7372–79 «Проволока стальная канатная», п. 2.5 ($P \geq 12450 \text{ Н/мм}^2$ (1270 кгс/мм^2)). Сопротивление разрыву отдельных проволок находится в интервале значений $2140\text{--}2390 \text{ Н/мм}^2$, что также соответствует требованиям ГОСТ 7372–79 ($\geq 1960 \text{ Н/мм}^2$). По временному сопротивлению разрыву проволока относится к маркировочной группе 2160 (220). Таким образом, механические свойства троса ножного управления удовлетворяют требованиям ГОСТ 7372–79 для углеродистой стали нормального качества.

В микрошлифе, изготовленном из фрагмента троса, расположенного на расстоянии 50 мм от мест обрыва проволок, обнаружена трещина, расположенная перпендикулярно

поверхности (рис. 11). Признаки пластической деформации поверхности в начальной зоне трещины отсутствуют. Микроструктура стальных проволок – сорбит.

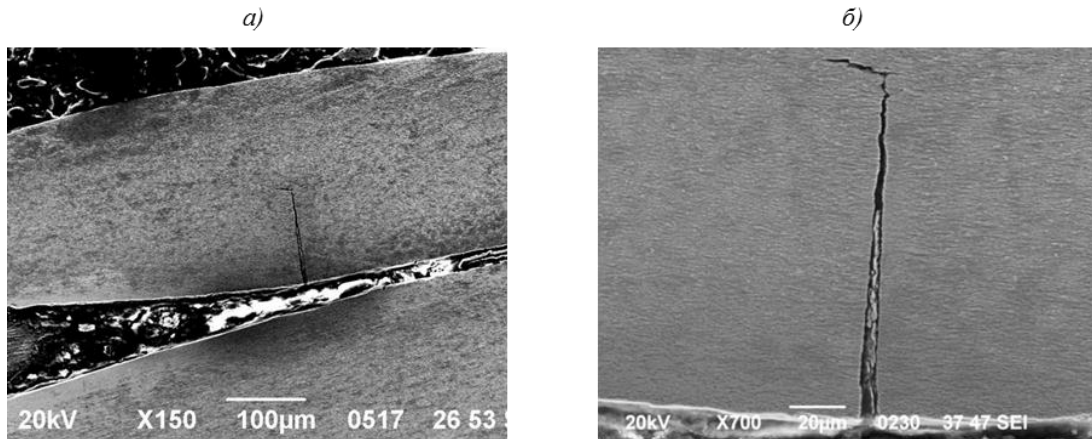


Рис. 11. Микрошлиф, изготовленный параллельно поверхности проволоки, с трещиной, развивающейся перпендикулярно поверхности проволоки

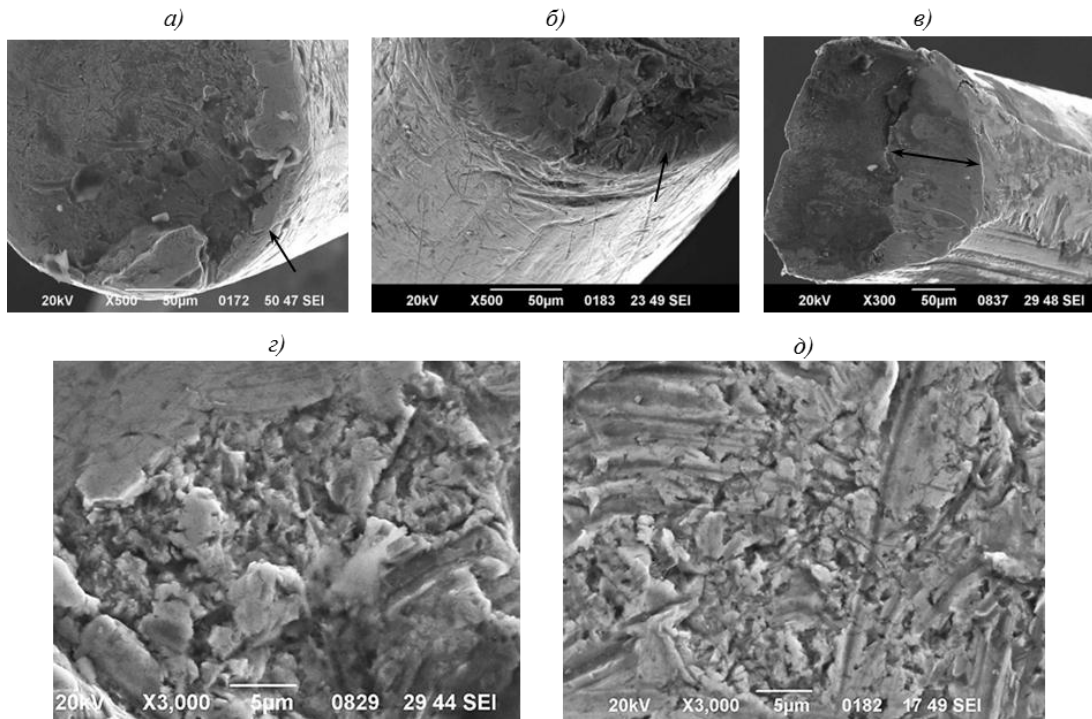


Рис. 12. Вид изломов отдельных проволок троса:
a, б – очаговые зоны; *в* – механическое повреждение поверхности излома в начальной зоне;
г, д – усталостный рельеф среза повреждаемых участков излома

При фрактографическом анализе обнаружено, что отдельные изломы проволок троса значительно повреждены механически и не поддаются идентификации. На всех исследованных проволоках отсутствуют признаки предшествующей пластической деформации. Пригодные для фрактографического анализа изломы ориентированы практически перпендикулярно поверхности проволок, что соответствует характеру роста обнаруженной при металлографическом анализе трещины. На сохранившихся изломах имеются следы усталостного развития трещины, образовавшейся от вмятин и царапин на боковых поверхностях проволок (рис. 12, показаны стрелками). В изломе одной из

проволок наблюдаются следы механического повреждения (смятия) со стороны поверхности (рис. 12, *в*, показано стрелкой), от которого развилось однократное разрушение по механизму среза.

Для сравнения характера разрушения проанализированы изломы проволок, испытанных на разрыв, как в составе каната, так и по отдельности. Из приведенных на рис. 13 изломов видно, что разрушению при испытаниях предшествовала пластическая деформация, о чем свидетельствует утонение сечения на 20%. Разрушение произошло по типу «чашка–конус» с формированием мелкоямочного рельефа в центре сечения проволоки (рис. 12). Таким образом, при фрактографическом анализе установлено принципиальное отличие в строении изломов проволок, испытанных на разрыв, и проволок, разрушившихся в процессе эксплуатации.

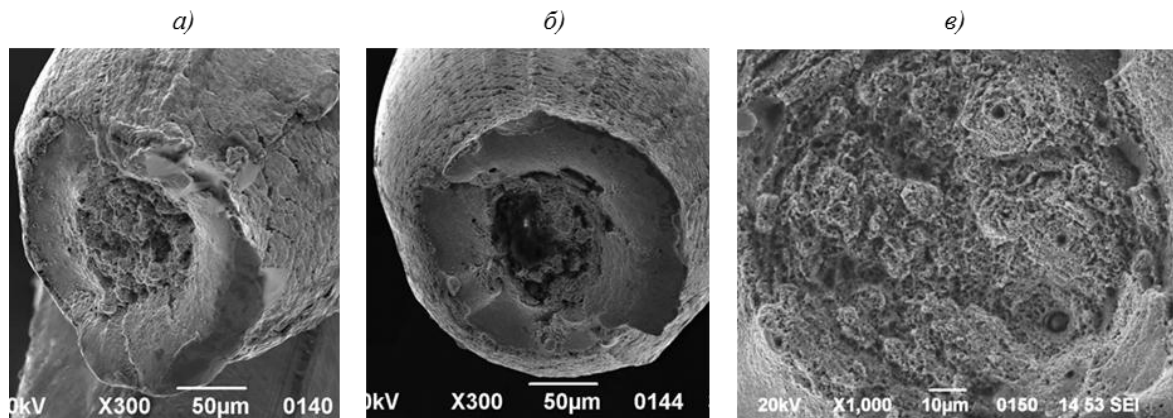


Рис. 13. Общий вид изломов отдельных проволок троса после испытаний на растяжение (*а*, *б*) и ямки в центральной части излома (*в*)

Рентгеноспектральный микроанализ выявил наличие цинкового покрытия на поверхности проволок (рис. 14).

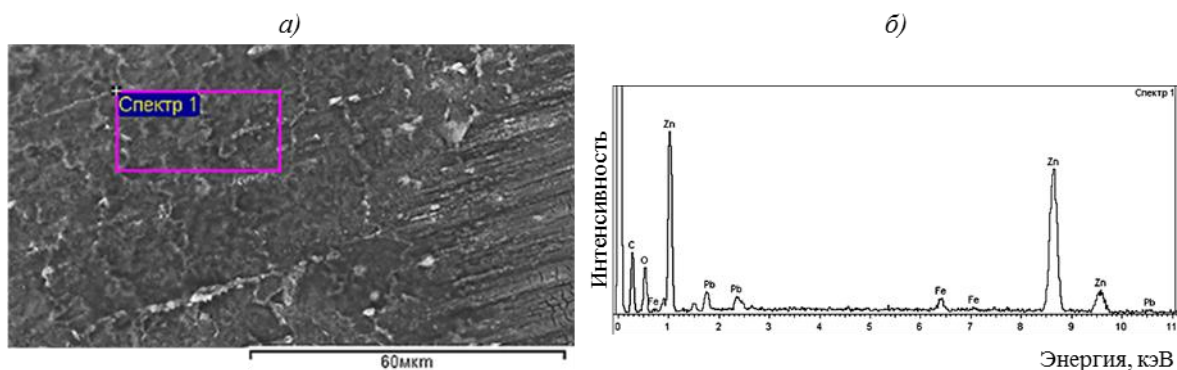


Рис. 14. Результаты рентгеноспектрального микроанализа поверхности проволок троса

Исследование цинкового покрытия при помощи растрового электронного микроскопа показало отсутствие сколов и отслоений. Установлено, что покрытие равномерное, а его качество соответствует ГОСТ 7372–80, п. 2.3.

Исследование причин разрушения пружин из стали 51ХФА

Исследовали изломы трех пружин из стали 51ХФА, разрушенных в результате испытаний сочленения деталей на износ. При визуальном осмотре установлено, что разрушение пружин прошло с двух сторон – по крайним рабочим и опорным виткам.

По наружным и внутренним поверхностям витков пружин наблюдаются полосы изнашивания материала разной интенсивности, причем максимальная интенсивность отмечена у мест разрушения. Плоскости изломов расположены под углом 45 градусов к оси проволоки (рис. 15).

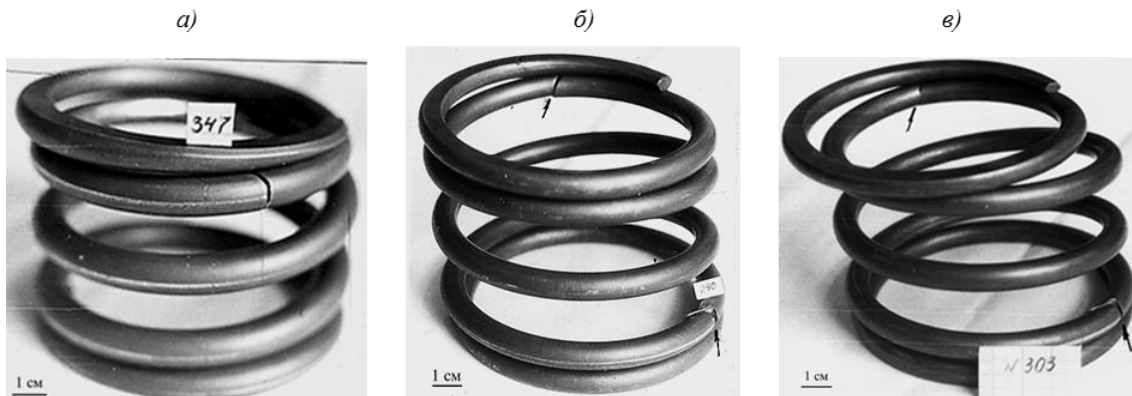


Рис. 15. Общий вид разрушенных пружин

Все изломы имеют один очаг разрушения, расположенный на поверхности в полосах износа между витками. Поверхности изломов окислены и частично затерты, в очаговых зонах наблюдаются свежие следы «замятия» поверхности. Макростроение изломов соответствует разрушению при нагружении по схеме изгиб с кручением. Дефектов структуры материала при фрактографическом исследовании не выявлено.

Фрактографический анализ при больших увеличениях показал, что излом соответствует разрушению при многоциклового усталости: очаговая зона сглажена, присутствуют зоны медленного и ускоренного развития усталостной трещины, область роста усталостной трещины имеет эллиптическую форму (рис. 16). Зона однократного долома имеет волокнистое строение. По периметру зоны долома расположена узкая зона (шириной от 0,5 до 1 мм), расположенная под углом 45 градусов к плоскости излома. Данная область представляет собой зону окончательного среза под действием касательных напряжений. На поверхности излома отмечено значительное количество продуктов окисления и фреттинг-коррозии.

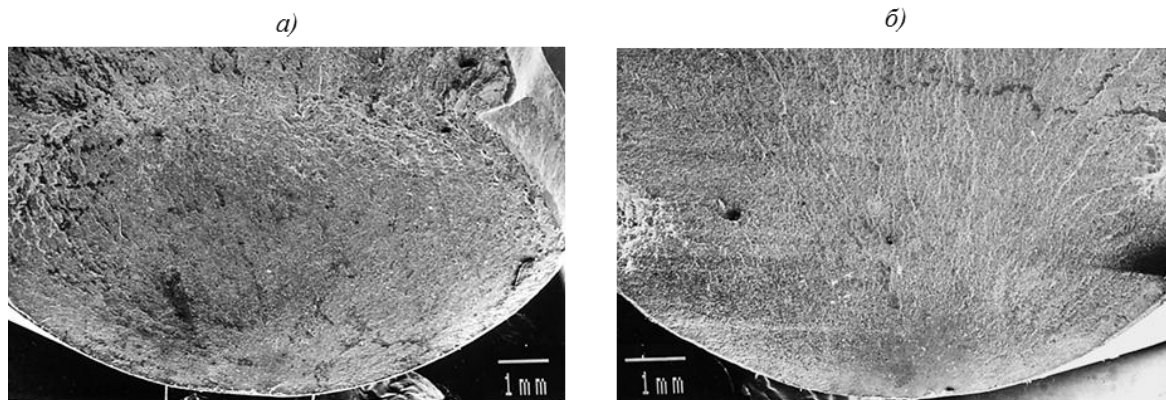


Рис. 16. Характерный вид очаговых зон разрушенных пружин

Особенностью рельефа зон медленного и ускоренного развития трещин в изломах пружин из стали 51ХФА является наличие мелких усталостных плато с микробороздками (рис. 17, а, б).

Вблизи очаговых зон бороздки слабо различимы, однако по мере развития усталостной трещины рельефность бороздок увеличивается, шаг бороздок возрастает до 1,6–1,9 мкм в конце зоны ускоренного развития (перед доломом). Главная особенность

рельефа – наличие в усталостных зонах участков хрупкого межзеренного разрушения, что свидетельствует о работе пружин в условиях повышенных напряжений (рис. 17, в, з). Установлено, что во всех исследованных изломах пружин доля участков межзеренного разрушения значительно возрастает по мере роста трещин. В зонах ускоренного развития трещин, наряду с плато с грубыми бороздками и участками межзеренного разрушения, выявлены отдельные участки ямочного рельефа.

Зона долома во всех изломах имеет смешанное строение: наблюдается внутризеренное вязкое мелкоямочное разрушение, участки квазисколов и единичные зернограничные фасетки, что типично для статических изломов данной стали (рис. 17, ж, з).

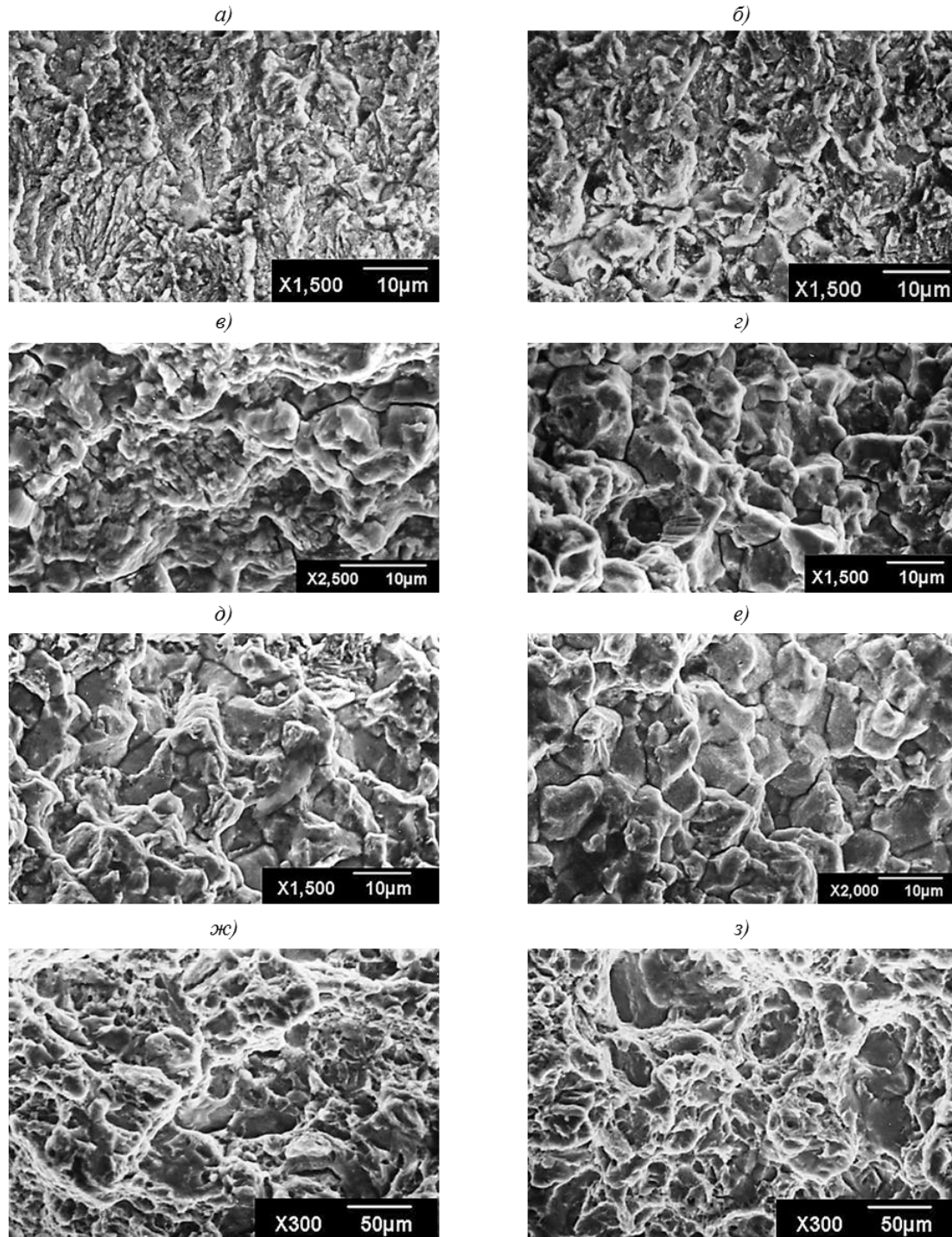


Рис. 17. Характерное строение усталостных зон изломов разрушенных пружин

По результатам химического анализа установлено, что материал пружин соответствует стали 51ХФА по ГОСТ 14959–2016. Микроструктура – сорбит отпуска, содержание неметаллических включений не превышает допустимого значения.

Обнаруженные на поверхности разрушенных пружин интенсивные кольцевые полосы износа материала с наклепом между опорными и крайними витками свидетельствуют о работе пружин с соударением и касанием витков друг друга, что способствовало перераспределению напряжений и увеличению осевой нагрузки. Наличие большого количества участков межзеренного разрушения подтверждает факт работы пружин при повышенных напряжениях.

Обсуждение и заключения

В результате исследований стального каната, разрушенного при транспортировке груза, установлено, что материал каната соответствует стали марки 60 (по ГОСТ 1050–88), микроструктура стали – высокодисперсный сорбит. Несущая способность троса характеризуется величиной не менее 170 кН. Предел прочности отдельных проволок составляет $\sigma_b=191\pm 3,3$ МПа.

Разрушение произошло при действии статических и динамических нагрузок (растяжение, изгиб, кручение). Следов усталостного разрушения не обнаружено. Причиной разрушения стального троса явилась значительная пластическая деформация около наконечника вследствие действия комплексных нагрузок.

Исследование повреждений троса ножного управления показало, что по результатам химического анализа и механических испытаний состав стали и механические свойства удовлетворяют требованиям ГОСТ 7372–79 для углеродистой стали нормального качества, микроструктура – сорбит, на поверхности проволок троса ножного управления присутствует ровное цинковое покрытие, без сколов и отслоений. Качество цинкового покрытия – по ГОСТ 7372–79, п. 2.3.

Фрактографический анализ показал, что разрушение в ходе эксплуатации отдельных проволок троса ножного управления имеет усталостный характер и развивалось от царапин и вмятин на поверхности.

Согласно проведенным исследованиям материала пружин состав стали и структура удовлетворяют требованиям ГОСТ 14959–2016. Разрушение пружин произошло под действием асимметричного циклического изгиба с кручением в результате контактной усталости.

Исследованы изломы деталей, изготовленных из сходных по составу сталей, определены причины разрушения изделий. Все исследованные материалы (сталь 60, сталь 55 и сталь 51ХФА) соответствовали требованиям нормативной документации по составу, структуре и содержанию неметаллических включений, а разрушения произошли только в результате механического воздействия от напряжений, превышающих допустимые (в первом и третьем случае). Выявлены отличия в строении изломов, полученных в результате воздействия комплексной статической нагрузки (первый случай) и циклических нагрузок как при небольших уровнях напряжений (второй случай), так и при повышенных напряжениях (третий случай). Присутствующее цинковое покрытие (первый и второй случаи) не оказывает влияния на характер разрушения стальных проволок, составляющих тросы.

В случае усталостного разрушения наибольшее влияние на разрушение оказывает наличие на поверхности механических повреждений (царапин и вмятин на поверхности проволок троса ножного управления) и контактной усталости (притертости на поверхностях пружин).

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Материалы – основа любого дела // Деловая слава России. 2013. №2 (40). С. 4–9.
2. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
3. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. №5. С. 8–18.
4. Стали и сплавы. Марочник / под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. 608 с.
5. ГОСТ 7372–79. Проволока стальная канатная. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2003. 17 с.
6. ГОСТ 1050–2013.Metalлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. М.: Стандартиформ, 2014. 32 с.
7. ГОСТ 14959–2016. Metalлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия. М.: Стандартиформ, 2017, 28 с.
8. Виноградов С.С., Никифоров А.А., Демин С.А., Чесноков Д.В. Защита от коррозии углеродистых сталей // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 242–263. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-242-263.
9. ГОСТ 2172–80. Канаты стальные авиационные. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2003. 8 с.
10. Бадиков К.А., Савкин А.Н., Андроник А.В. Оценка трещиностойкости низколегированной стали при нерегулярном циклическом нагружении // Авиационные материалы и технологии. 2015. №S1. С. 20–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S1-20-26.
11. Громов В.И., Вознесенская Н.М., Покровская Н.Г., Тонышева О.А. Высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали ФГУП «ВИАМ» для изделий авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 159–174. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-159-174.
12. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Нинь Хай Ле, Ха Нгок Нго. Связь морфологии вязких изломов различной природы и свойств конструкционных сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2018. №4. С. 36–41.
13. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Траченко В.А. и др. Измерение неоднородности разрушения в конструкционных сталях с разнородной структурой // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. №4. С. 12–18.
14. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Нинь Хай Ле и др. Оценка строения изломов и структур в конструкционных сталях с использованием компьютеризированных процедур // Вектор науки ТГУ. 2015. №4. С. 44–52.
15. Григоренко В.Б., Морозова Л.В. Применение растровой электронной микроскопии для изучения начальных стадий разрушения // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1 (50). С. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.