

Научная статья

УДК 669.018.29

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-27-39

**АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ В ДЕТАЛЯХ ИЗ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ***Л.В. Морозова<sup>1</sup>, В.Б. Григоренко<sup>2</sup>, А.М. Терехин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Производственный комплекс «Салют» акционерного общества «Объединенная двигателестроительная корпорация», Москва, Россия; info@uecrus.com

**Аннотация.** Проведено комплексное исследование деталей из конструкционных сталей с целью установления характера их разрушения и определения типа выявленных дефектов. Методами металлографического и фраттографического анализов изучены строение эксплуатационных изломов и вскрытых вторичных трещин, микроструктура сталей. Установлено, что разрушению рессоры из стали 30ХГСН2А-ВД способствовало наличие грубых рисок и обезуглероженного слоя на внутренней поверхности. В деталях, изготовленных из стали 30ХГСА, выявлены нарушения на этапе термической и механической обработки.

**Ключевые слова:** фраттография, фраттографический анализ, растровая электронная микроскопия, разрушение, усталостное разрушение, усталостная трещина, рессора, сталь

**Для цитирования:** Морозова Л.В., Григоренко В.Б., Терехин А.М. Анализ дефектов в деталях из конструкционных сталей // Труды ВИАМ. 2025. № 10 (152). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-27-39.

Scientific article

**ANALYSIS OF DEFECTS IN PARTS MADE OF STRUCTURAL STEEL***L.V. Morozova<sup>1</sup>, V.B. Grigorenko<sup>2</sup>, A.M. Terekhin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Production complex «Salut» of Joint Stock Company «United engine corporation», Moscow, Russia, info@uecrus.com

**Abstract.** A comprehensive study of structural steel parts was conducted to establish the nature of their destruction and to determine the type of defects detected. Metallographic and fractographic analysis methods were used to study operating structure, opened cracks and the microstructure of steels. It was found that the destruction of a spring made of 30HGSN2A-VD steel was facilitated by the presence of coarse scratches and a decarburized layer on the inner surface. In parts made of 30HGSA steel, defects were detected at the stage of thermal and mechanical treatment.

**Keywords:** fractography, fractographic analysis, scanning electron microscopy, damage, fatigue fracture, fatigue crack, spring, steel

**For citation:** Morozova L.V., Grigorenko V.B., Terekhin A.M. Analysis of defects in parts made of structural steel. *Trudy VIAM*, 2025, no. 10 (152), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-27-39.

### Введение

Конструкционные легированные стали, такие как 30ХГСА и 30ХГСН2А, применяются при изготовлении изделий, работающих под нагрузкой. Из этих сталей изготавливают шестерни, зубчатые валы, рычаги, оси, шпильки, пальцы, фланцы, валики и другие ответственные детали [1, 2].

Химический состав сталей 30ХГСА и 30ХГСН2А регламентируется ГОСТ 4543–2016. Улучшаемая среднелегированная сталь 30ХГСА (хромансиль) широко применяется при изготовлении сварных и механически обработанных деталей, работающих в атмосферных условиях и при температурах не ниже  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Верхний предел рабочих температур напрямую зависит от температуры отпуска либо изотермической закалки, а также от наличия защиты от коррозии и температурного интервала ее работоспособности. Благодаря высокому содержанию углерода данная сталь отличается прочностью и устойчивостью к нагрузкам, что объясняет ее широкое применение в машиностроении, строительной и авиационной отраслях. При этом уровень пластичности позволяет применять штамповку и ковку для ее обработки, а в отожженном состоянии сталь поддается резанию и механической обработке поверхности [3].

Добавки хрома отвечают за повышение коррозионной стойкости, жаропрочности, сопротивления абразивному износу, а также улучшают закаливаемость. При этом небольшое содержание хрома (0,8–1,1 %) не позволяет отнести сталь к категории коррозионностойких. При эксплуатации в условиях повышенной влажности на поверхности незащищенных деталей будет образовываться оксид железа (ржавчина). Для повышения коррозионной стойкости детали из стали 30ХГСА эксплуатируют после нанесения защитных гальванических покрытий на основе цинка и хрома.

Благодаря наличию марганца в составе стали снижается содержание вредных примесей, уменьшается риск образования трещин и окалины во время термообработки. Марганец также способствует увеличению свариваемости и общей пластичности стали. При проведении термообработки сталь нагревают до температуры  $870\text{ }^{\circ}\text{C}$  с последующим быстрым охлаждением в воде или масле. Возникающие при этом закалочные напряжения снимают за счет применения высокого отпуска – нагрева до температур  $540\text{--}560\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что также повышает упругие свойства стали [4].

Высокопрочная среднелегированная сталь 30ХГСН2А используется при изготовлении наиболее ответственных (в том числе сварных) деталей крыла, шасси и центроплана, работающих на срез и растяжение при температурах до  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Сваривается ручной, электронно-лучевой и автоматической сваркой в среде защитных газов. При этом обязательно размещение сварных швов вне зон концентраторов напряжений, предусмотренных в чертежах [1, 5].

Наличие никеля повышает коррозионную стойкость, прочность, пластичность и прокаливаемость. Добавки никеля увеличивают сопротивление усталости без уменьшения пластичности, что объясняет его наличие в сталях, применяемых при изготовлении нагруженных деталей.

Механическую обработку высокопрочных сталей проводят до закалки, так как наилучшая обрабатываемость резанием достигается после того, как сталь подвергли низкотемпературному отжигу (при температурах  $680\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) с быстрым охлаждением на воздухе. Итоговую чистовую обработку проводят уже после полного цикла термической обработки. При этом следует соблюдать режимы, обеспечивающие отсутствие прижогов на поверхности. Сталь чувствительна к концентраторам напряжений, в связи с чем с поверхности деталей необходимо удалять заусенцы и окалину. В зонах концентрации напряжений параметр шероховатости поверхности  $R_a$  не должен превышать значения  $1,6\text{ }\mu\text{m}$  [6, 7].

Несмотря на широкое использование среднелегированных сталей в различных отраслях благодаря их универсальности, существует необходимость разрабатывать и применять специализированные высоколегированные стали, отвечающие более жестким требованиям [8, 9]. Это стали с повышенным уровнем устойчивости к истиранию и прочности, жаростойкостью и сопротивлением к воздействию агрессивных сред. Добавление даже таких доступных элементов, как азот, заметно улучшает свойства стали, а добавки редкоземельных элементов позволяют добиться уникальных характеристик (повышенная твердость и тугоплавкость) [10].

Методики неразрушающего контроля широко востребованы на этапах предэксплуатационного контроля, периодических профилактических осмотров и аварийных исследований, так как позволяют оценить состояние детали, не нанося повреждений, несовместимых с дальнейшей эксплуатацией. Магнитопорошковый и люминесцентный методы контроля применяют для выявления различных поверхностных дефектов, таких как трещины, питтинги, а также дефектов, расположенных под поверхностью и обладающих повышенными внутренними напряжениями [11].

Для оценки работоспособности, ресурса и несущей способности материала проверяют механические свойства. Испытания на растяжение, ударный изгиб, длительную прочность и усталость являются информативными для оценки состояния материала [12–14], но в случае малых размеров детали не всегда удается провести полную оценку механических свойств. В этом случае на помощь приходят малоинвазивные методы исследования, например измерение твердости. Индентирование поверхности изделия позволяет, не нанося существенных повреждений, оценить механические свойства благодаря зависимостям, связывающим характеристики прочности и пластичности с твердостью материала [15].

Стабильная работа узлов и механизмов зависит не только от выбранного материала, но и от качества изготовления, сборки и установки деталей. Важно, чтобы не было нарушений на всех этапах: от выбора марки стали до ее термо- и механической обработки, монтажа и условий эксплуатации. В случае возникновения эксплуатационных разрушений методы оптической и электронной микроскопии широко применяются для выявления причин аварий [16].

Комплексный анализ разрушенных деталей должен включать неразрушающий контроль, определение химического состава, металлографические и фрактографические исследования, проверку механических свойств. Всестороннее исследование позволяет установить причины разрушения и принять комплекс мер, направленных на предотвращение подобных ситуаций в дальнейшем [17, 18].

В данной статье рассмотрены дефекты в конструкционных сталях и результаты комплексных исследований, проведенных с применением различных методик.

Полученные результаты исследований являются продуктом деятельности АО «ОДК».

### **Материалы и методы**

При установлении причин разрушения деталей из конструкционных сталей проведены внешний осмотр и фотосъемка, анализ сопроводительной технической документации, фрактографический анализ мест разрушения и вскрытых вторичных трещин, анализ химического состава для подтверждения марок сталей. Проведен неразрушающий контроль, электронно-зондовый микроанализ и исследования с использованием металлографических методов.

Микроструктуру анализировали с применением оптического конфокального микроскопа высокого разрешения. Фрактографический анализ проводили с использованием растрового электронного микроскопа с приставкой для энергодисперсионного анализа в соответствии с ГОСТ Р ИСО 22309–2015.

Анализ химического состава деталей проводили спектральным атомно-абсорбционным методом в соответствии с требованиями ГОСТ 28473–90. Содержание углерода определяли методом инфракрасной спектроскопии на кулонометрической установке согласно ГОСТ 12344–2003.

Подготовку шлифов осуществляли с применением металлографического комплекса. Микроструктуру выявляли методами электролитического травления либо травлением в 4%-ном спиртовом растворе азотной кислоты в соответствии с ГОСТ 8233–56.

Магнитопорошковая дефектоскопия проведена с применением специализированного контролирующего комплекса согласно ГОСТ Р 56512–2015.

Твердость деталей определяли методами Виккерса (ГОСТ 2999–75) и Роквелла (ГОСТ 9013–59).

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Результаты и обсуждение

#### *Исследование причин разрушения рессоры основной опоры шасси из стали 30ХГСН2А-ВД*

Разрушение рессоры основной опоры шасси (рис. 1) произошло на расстоянии ~400 мм от точки пересечения оси рессоры и полуоси установки колеса. Вид излома показан на рис. 1, *а*. Конструктивно рессора представляет собой трубу  $\varnothing 50$  мм, длиной 1500 мм и толщиной стенки 4 мм. При осмотре демонтированной рессоры на наружной поверхности на расстоянии 80–100 мм от входа в шаровую опору фюзеляжа обнаружена несквозная трещина протяженностью ~12 мм (рис. 1, *б*). Следует отметить, что первичное разрушение развивалось от внутренней поверхности рессоры, в то время как вторичная трещина – от наружной.

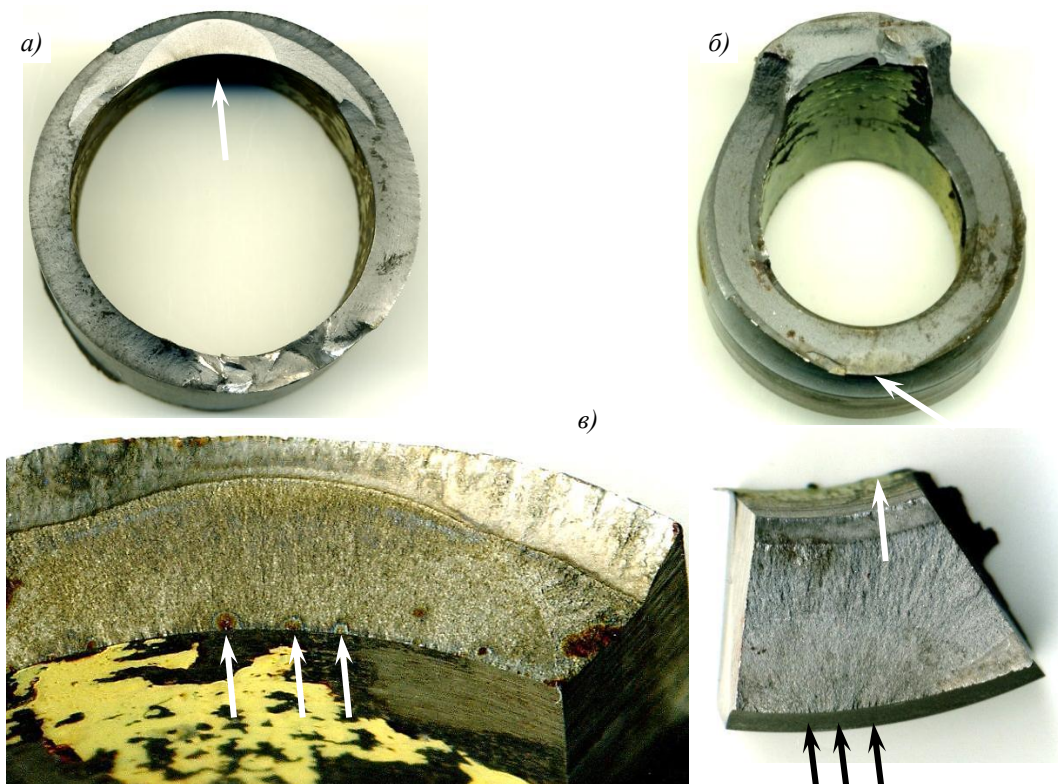


Рис. 1. Макростроение излома рессоры: *а* – первичная трещина; *б* – вскрытая вторичная трещина; *в* – вид излома, образованного первичной трещиной. Стрелками отмечены очаги разрушения

Согласно требованиям технической документации, рессора должна изготавливаться из трубы размером 63,5×14 мм из стали 30ХГСН2А-ВД (ТУ 14-3-674–78) и термически обрабатываться на прочность 1400–1600 МПа с применением изотермической закалки. Исследованная рессора изготовлена из прутка, отверстие  $\varnothing 50$  мм выполнено сверлением.

*Определение химического состава материала рессоры*

Данные химического анализа материала рессоры подтвердили соответствие требованиям ГОСТ 5632–2014. Результаты химического анализа материала рессоры приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Химический состав материала рессоры из стали 30ХГСН2А-ВД**

Образец	Содержание элементов, % (по массе)										
	C	Mo	V	W	Cu	Ni	Si	Mn	Cr	P	S
Рессора	0,32	0,04	0,03	0,015	0,08	0,37	0,30	0,48	12,8	0,025	0,011
Согласно ГОСТ 5632–2014	0,26–0,35	≤0,30	≤0,20	≤0,20	≤0,30	≤0,60	≤0,80	≤0,80	12–14	≤0,03	≤0,025

*Фрактографический анализ*

Макроанализ излома рессоры показал, что разрушение усталостное, многоочаговое, развивалось от внутренней поверхности, где наблюдаются следы грунта и грубые риски от сверления. Очаги разрушения расположены на одной из грубых рисок от механической обработки (рис. 1, в).

Результаты анализа излома на электронном микроскопе подтвердили усталостный характер разрушения. В очагах разрушения наблюдается межзеренный излом. В доломе, расположенном вблизи наружной поверхности, также отмечены участки с межзеренным изломом.

Анализ излома вскрытой трещины, развивавшейся с наружной поверхности, показал, что она имеет меньшую глубину развития, в усталостной зоне излом визуально более шероховатый, чем в месте полного разрушения. Меньшая площадь и более выраженная шероховатость указывают на вторичность этой усталостной трещины. На наружной поверхности рессоры наблюдаются следы пескоструйной обработки. Очаги разрушения, как правило, связаны с наиболее глубокими вмятинами от пескоструйной обработки.

*Металлографический анализ и оценка твердости*

Установлено, что деталь термически обработана на прочность 1700–1850 МПа (48,5–50 HRC, 530–540 HV) [19]. Структура стали – мартенсит, следов пережога и перегрева не наблюдается (рис. 2). Величина зерна соответствует 7 баллу шкалы ГОСТ 5639–82. Загрязненность неметаллическими включениями по сульфидам и оксидам соответствует 3–4 и 2–3 баллу соответственно (ГОСТ 1778–2022).

В зоне основного разрушения на внутренней и внешней поверхностях наблюдается обезуглероженный слой (рис. 3). Общая глубина обезуглероживания (ферритного слоя и зоны частичного обезуглероживания) по ГОСТ 1763–68 составляет ~0,4 мм. В соответствии с чертежом, при изготовлении рессор на внутренней поверхности допускается наличие окалина. Следует отметить, что наличие обезуглероженного слоя

снижает сопротивление усталости вследствие ослабления границ зерен (прочность ферритного слоя составляет 700–900 МПа).

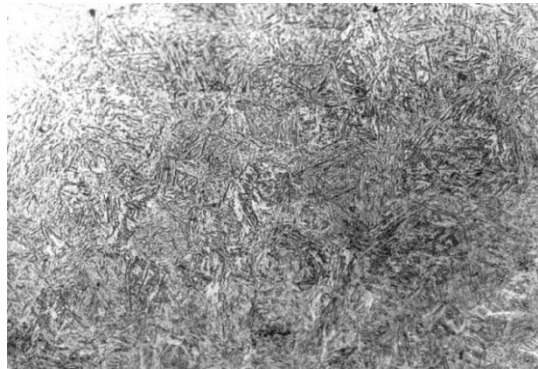


Рис. 2. Микроструктура ( $\times 320$ ) стали 30XGCH2A-BD в области основного разрушения



Рис. 3. Обезуглероженный слой на внутренней поверхности рессор в месте основного разрушения ( $\times 500$ )

При анализе микроструктуры на внутренней поверхности рессоры в зоне основного разрушения выявлено много трещин, параллельных излому. Вдоль кромки трещин во всех случаях наблюдается окисленный слой. При визуальной оценке шероховатость наружной поверхности значительно больше, чем шероховатость внутренней.

В месте расположения несквозной усталостной трещины на наружной поверхности обезуглероженный слой практически отсутствует, но присутствует на внутренней поверхности. Это связано с тем, что на внешней поверхности проведены механическая и пескоструйная обработки, в то время как на внутренней поверхности пескоструйная обработка не осуществлена. Со стороны наружной поверхности выявлена трещина, перпендикулярная поверхности излома, проходящая по строчкам сульфидов.

Для повышения сопротивления усталости рекомендовано:

- рессору изготавливать из трубы в соответствии с требованиями чертежа;
- использовать сталь вакуумно-дугового переплава;
- повысить качество механической обработки;
- контролировать размер фракции песка при пескоструйной обработке;
- нагрев под закалку следует проводить в безокислительной или нейтральной атмосфере, вакууме для исключения образования обезуглероженного слоя.

### *Исследование детали «болт откидной» из стали 30XGCA*

При проведении магнитного контроля на сфере  $\varnothing 60$  мм и цилиндре  $\varnothing 30$  мм обнаружены отложения магнитного порошка в виде отдельных точек и линий. Внешний вид детали и отложений представлен на рис. 4. Отложения в виде линий обнаружены в диаметрально расположенных зонах цилиндра  $\varnothing 30$  мм.

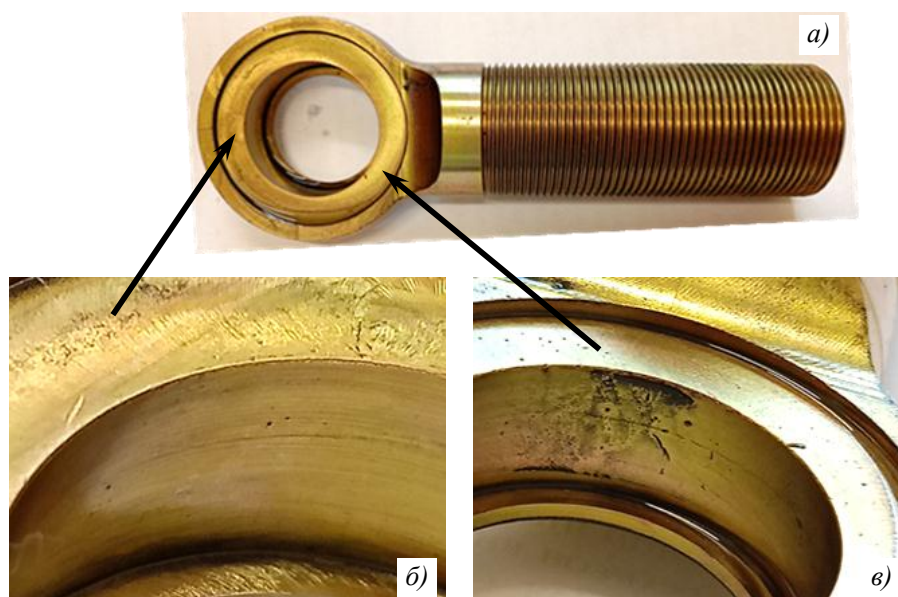


Рис. 4. Внешний вид детали (а) и места отложения магнитного порошка (б, в). Стрелками указаны диаметрально расположенные зоны, в которых обнаружены отложения в виде линий

Согласно результатам химического анализа, деталь изготовлена из стали 30ХГСА, как и предусмотрено требованиями чертежа.

Исследование методами электронной микроскопии поверхности детали в местах точечных отложений магнитного порошка выявило мелкие раковины размером до 0,3 мм (рис. 5), однако определить причину их образования из-за нанесенного цинкового покрытия не представляется возможным.

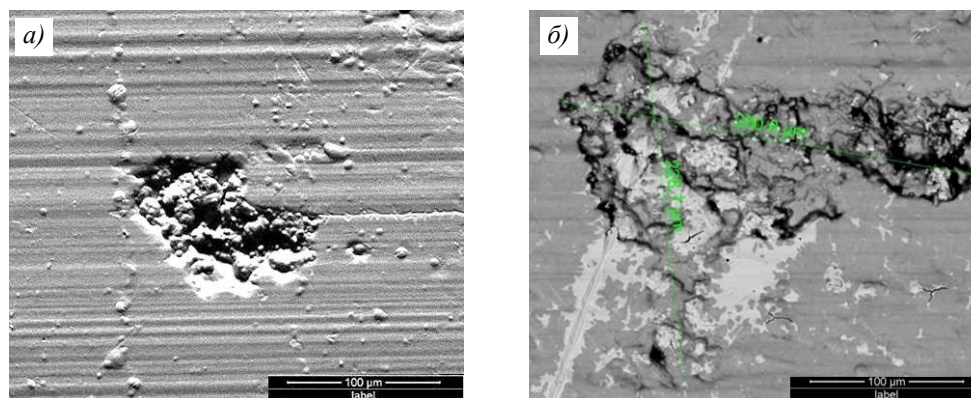


Рис. 5. Вид дефектов на поверхности сферы Ø60 мм (а) и цилиндра Ø30 мм (б)

Исследование поверхности отверстия (цилиндр Ø30 мм) в области протяженных отложений магнитного порошка, показанных на рис. 4, в, выявило наличие сетки тонких трещин (рис. 6, а). При анализе структуры микрошлифов, изготовленных в зоне залегания поверхностных трещин, обнаружены тонкие разветвленные трещины (рис. 6, б), как расположенные под поверхностью, так и распространяющиеся от поверхности вглубь материала на расстояние до 2 мм.

Траектория распространения трещин как на поверхности, так и в плоскости шлифа свидетельствует об их статическом характере. Проведенный электронно-зондовый микроанализ показал, что трещины окислены, а на участках трещин, выходящих на поверхность, помимо пиков кислорода, присутствуют пики цинка (рис. 7, табл. 2).

Наличие кислорода на поверхности указывает на возникновение трещин во время механической обработки детали с применением смазочно-охлаждающей жидкости. При последующем нанесении покрытия произошло проникновение цинка по сформировавшимся трещинам вглубь материала.

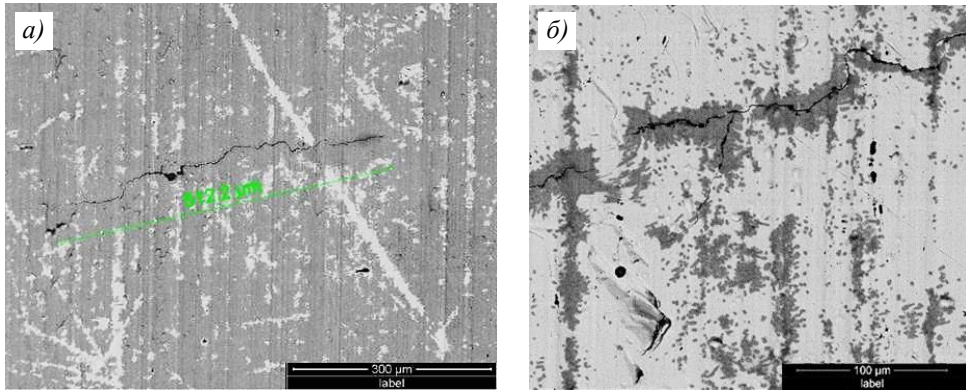


Рис. 6. Вид трещин на поверхности цилиндра Ø30 мм

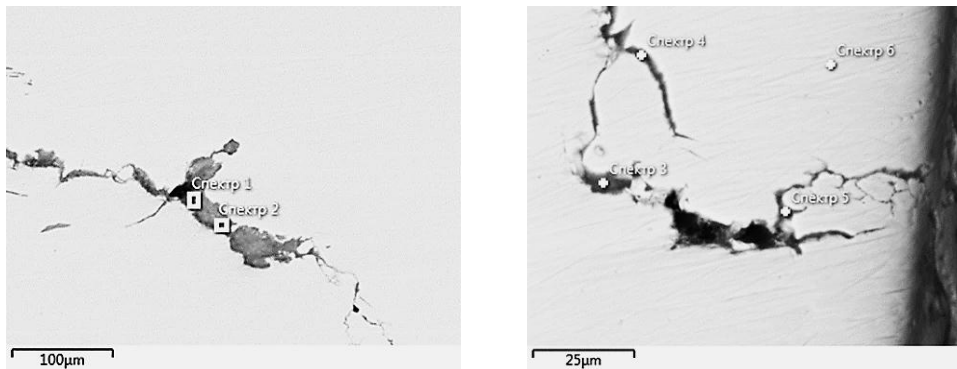


Рис. 7. Вид трещин в материале образцов и участки проведения электронно-зондового микроанализа

Таблица 2

Результаты электронно-зондового микроанализа

Спектр	Содержание элемента, % (по массе)								
	O	Na	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Zn
1	25,30	–	1,02	0,28	0,64	0,67	2,79	69,30	–
2	20,68	0,84	0,96	0,24	0,40	1,14	3,80	71,76	0,18
3	28,42	–	0,76	0,35	1,68	0,50	0,83	64,12	3,33
4	17,53	–	0,44	0,45	0,88	0,65	0,99	71,19	7,88
5	9,24	–	1,39	0,10	0,52	1,14	1,08	84,95	1,60
6	–	–	1,07	–	–	0,96	0,91	97,06	–

Согласно результатам металлографических исследований шлифов, изготовленных в поперечном и продольном сечениях, в материале детали имеются неметаллические включения – оксиды, сульфиды и оксисульфиды, содержание которых соответствует 1–2 баллу (при оценке по методу Ш ГОСТ 1778–2022).

Микроструктура материала – феррит и пластинчатый перлит. Ликвационная неоднородность, сетка феррита или иные дефекты исходного металла не выявлены.

В изломе, полученном при разрушении ударного образца, наблюдаются внутризеренные квазихрупкие фасетки с вторичными трещинами по границам зерен (рис. 8). Полученное значение ударной вязкости  $KCU$  составляет  $94,2 \text{ Дж/см}^2$ , что меньше, чем значения, заявленные в сертификате качества, который прилагался к детали ( $KCU = 150 \text{ Дж/см}^2$ ).

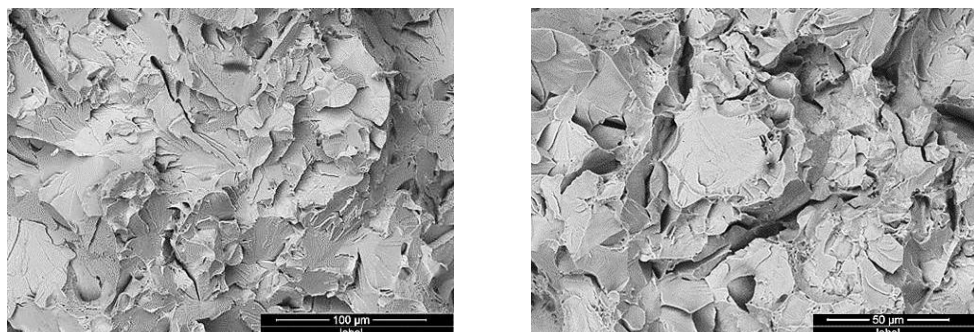


Рис. 8. Фасетки квазиотрыва в изломе ударного образца

### *Исследование детали «палец левый» из стали 30ХГСА*

Внешний вид детали представлен на рис. 9. По результатам магнитного контроля поверхности участка  $\varnothing 38 \text{ мм}$  и с торцевой стороны детали обнаружено оседание магнитного порошка в виде тонких черных линий протяженностью до  $\sim 3 \text{ мм}$  (рис. 10).



Рис. 9. Внешний вид детали «палец левый»

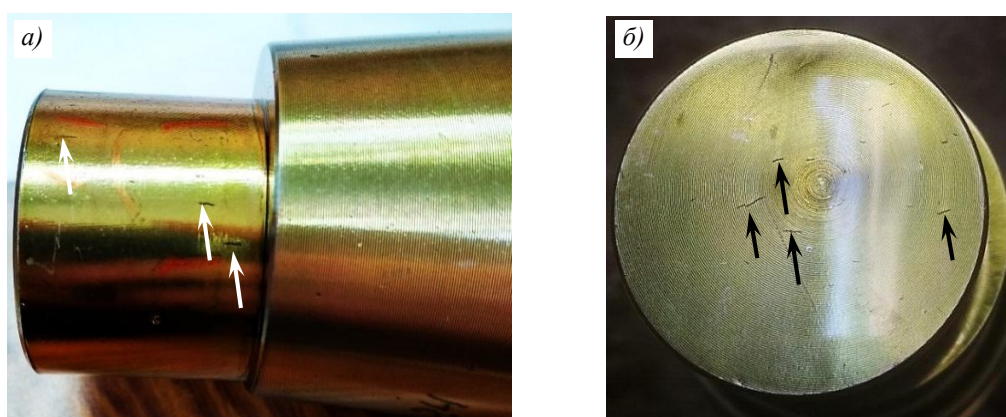


Рис. 10. Осаждение магнитного порошка на поверхности участка  $\varnothing 38 \text{ мм}$  (а) и торце детали (б)

Согласно результатам химического анализа, деталь изготовлена из стали 30ХГСА, что соответствует требованиям чертежа и нормативной документации.

Твердость материала детали составляет 27 HRC (в соответствии с чертежом это значение должно достигать 30–35 HRC).

В ходе металлографического исследования шлифов, изготовленных в зоне дефекта, установлено, что в продольном сечении имеются несплошности материала в виде тонких трещин. Отдельные трещины, развивающиеся от поверхности детали, проходят по границам зерен в основной материал на глубину до 3,9 мм (рис. 11).

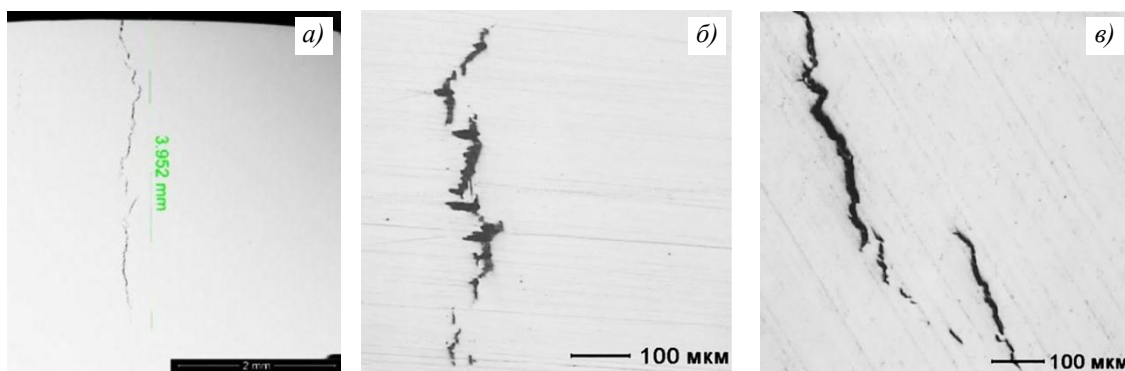


Рис. 11. Трещины в продольном (а, б) и поперечном (в) сечениях

Поверхность этих трещин окислена, что подтверждается данными электронно-зондового микроанализа. В спектрограммах поверхности трещин отмечены пики кислорода повышенной интенсивности.

В центральной части шлифа присутствуют тонкие трещины протяженностью до 2 мм, поверхность которых не имеет следов окисления. В зоне образования трещин дефектов металлургического происхождения не выявлено.

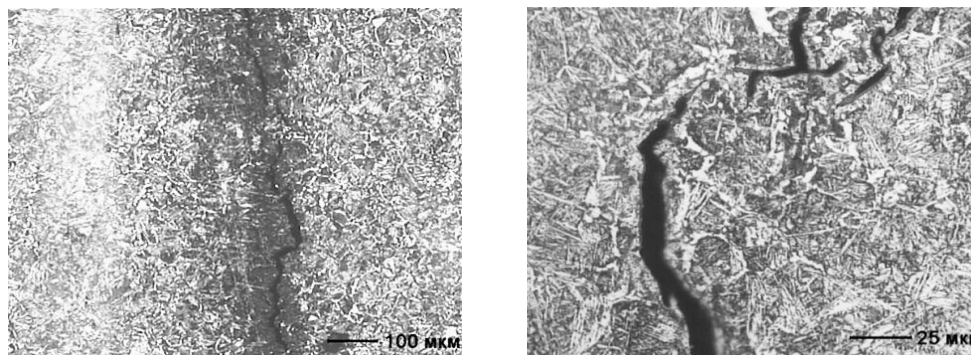


Рис. 12. Микроструктура детали в зоне дефектов после травления

В макро- и микроструктуре продольного сечения наблюдается структурная неоднородность. На шлифах после травления частично выявляется перлитная структура с сеткой феррита по границам зерен, частично – крупноигльчатая структура. Выявленная неоднородность указывает на то, что структура неомогенизирована в процессе термообработки (рис. 12).

### Заключения

На основании результатов исследования трех деталей из среднелегированных сталей выявлено, что их химический состав соответствовал требованиям чертежа и нормативной документации.

Установлено, что усталостному разрушению рессоры, изготовленной из стали 30ХГСН2А-ВД, способствовало наличие грубых рисок и обезуглероженного слоя на наружной и внутренней поверхностях.

В ходе исследования дефектов, выявленных в детали «болт откидной», изготовленной из стали 30ХГСА, отмечено снижение твердости. Показано, что отложения магнитного порошка обусловлены наличием сети тонких трещин, образовавшихся в процессе механической обработки детали до нанесения цинкового покрытия. Последующее нанесение покрытия привело к проникновению цинка по сформировавшимся трещинам вглубь материала.

Исследование детали «палец левый», изготовленной из стали 30ХГСА, показало снижение твердости, наличие ликвационной неоднородности, обусловленной некачественной термической обработкой, и трещин, сформировавшихся в ликвационных зонах.

Рекомендовано усиление контроля на этапе термической и механической обработки деталей.

#### Список источников

1. Специальные стали: в 2 т. 2-е изд., сокр. и перераб. М.: Металлургия, 1966. Т. 1. 741 с.
2. Специальные стали: в 2 т. 2-е изд., сокр. и перераб. М.: Металлургия, 1966. Т. 2. 532 с.
3. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2014. 491 с.
4. Новиков И.И., Золоторевский В.С., Портной К.К. и др. Металловедение: учеб. в 2 т. / под общ. ред. В.С. Золоторевского. М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. Т. 1. 496 с.
5. Новиков И.И., Золоторевский В.С., Портной К.К. и др. Металловедение: учеб. в 2 т. / под общ. ред. В.С. Золоторевского. М.: Издательский Дом МИСиС, 2009. Т. 2. 528 с.
6. Гуляев А.П. Металловедение: учеб. для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
7. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. В 2 т. М.: Металлургия, 1968. Т. 1. 596 с.
8. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
9. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
10. Громов В.И., Якушева Н.А., Востриков А.В., Черкашнев Н.Н. Высокопрочные конструкционные стали для валов газотурбинных двигателей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
11. Леднев И.С. Магнитные методы неразрушающего контроля деталей авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 1 (74). Ст. 09. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-111-120.
12. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 2. Анализ уравнения Басквина–Мэнсона–Коффина. Методики испытаний и обработки результатов // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 1 (62). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
13. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов: учеб. для вузов. 2-е изд. М.: Металлургия, 1983. 352 с.
14. Ерасов В.С., Орешко Е.И. Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Часть 1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.

15. Ерасов В.С., Орешко Е.И., Луценко А.Н. Многоуровневое масштабное комплексное исследование деформирования металлических материалов // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 1 (66). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-129-142.
16. 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.
17. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М.: МИСиС, 2007. 259 с.
18. Гордеева Т.А., Жегина И.П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. М.: Машиностроение, 1978. 200 с.
19. Машиностроение: энциклопедия в 40 т. М.: Машиностроение, 2010. Т. II-1: Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов / под общ. ред. Е.И. Мамаевой. 852 с.

### References

1. *Special Steels*: in 2 vols. 2nd ed., add. and rev. Moscow: Metallurgiya, 1966, vol. 1, 741 p.
2. *Special Steels*: in 2 vols. 2nd ed., add. and rev. Moscow: Metallurgiya, 1966, vol. 2, 532 p.
3. *Brand Book of Steels and Alloys*. 4th ed., rev. and add. Ed. Yu.G. Dragunov, A.S. Zubchenko. Moscow: Mashinostroenie, 2014, 491 p.
4. Novikov I.I., Zolotarevsky V.S., Portnoy K.K. et al. *Metal Science*: textbook in 2 vols. Ed. V.S. Zolotarevsky. Moscow: MISiS Publ. House, 2009, vol. 1, 496 p.
5. Novikov I.I., Zolotarevsky V.S., Portnoy K.K. et al. *Metallurgy*: textbook in 2 vols. Ed. V.S. Zolotarevsky. Moscow: MISiS Publ. House, 2009, vol. 2, 528 p.
6. Gulyaev A.P. *Metallurgy*: textbook for univ., 6th ed., rev. and add. Moscow: Metallurgiya, 1986, 544 p.
7. Bernstein M.L. *Thermo-mechanical processing of metals and alloys*: in 2 vols. Moscow: Metallurgiya, 1968, vol. 1, 596 p.
8. Kablov E.N. The key problem is materials. *Trends and guidelines for innovative development in Russia*. Moscow: VIAM, 2015, pp. 458–464.
9. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
10. Gromov V.I., Yakusheva N.A., Vostrikov A.V., Cherkashneva N.N. High strength structural steels for gas-turbine engine shafts (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-3-12.
11. Lednev I.S. Magnetic methods of non-destructive testing of aircraft parts. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 1 (74), paper no. 09. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-111-120.
12. Erasov V.S., Oreshko E.I. Tests for fatigue of metal materials (review). Part 2. Analysis of the Basquin–Manson–Coffin equation. Methods of testing and processing of results. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-80-94.
13. Zolotarevsky V.S. *Mechanical properties of metals*: textbook for univ. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1983, 352 p.
14. Erasov V.S., Oreshko E.I. Fatigue tests of metal materials (review). Part 1. Main definitions, loading parameters, representation of results of tests. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 59–70. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
15. Erasov V.S., Oreshko E.I., Lutsenko A.N. Multilevel large-scale complex research of deformation of metal materials. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 1 (66), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 16, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-129-142.

16. Grigorenko V.B., Morozova L.V. Application of the scanning electron microscopy for studying of initial destruction stages. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 77–87. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-77-87.
17. Klevtsov G.V., Botvina L.R., Klevtsova N.A., Limar L.V. *Fractal diagnostics of fracture of metallic materials and structures*. Moscow: MISiS, 2007, 259 p.
18. Gordeeva T.A., Zhegina I.P. *Analysis of fractures in assessing the reliability of materials*. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 200 p.
19. *Mechanical engineering: encyclopedia in 40 vols*. Moscow: Mashinostroenie, 2010, vol. II-1: Physical and mechanical properties. Testing of metallic materials. Ed. E.I. Mamaeva, 852 p.

*Информация об авторах*

**Морозова Лариса Владимировна**, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Григоренко Валентина Борисовна**, ведущий инженер, к.т.н., ПК «Салют» АО «ОДК», info@uecrus.com

**Терехин Андрей Михайлович**, начальник центральной заводской лаборатории, к.т.н., ПК «Салют» АО «ОДК», info@uecrus.com

*Information about the authors*

**Larisa V. Morozova**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Valentina B. Grigorenko**, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), PC «Salut» of JSC «United engine corporation», info@uecrus.com

**Andrey M. Terekhin**, Head of the central factory laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), PC «Salut» of JSC «United engine corporation», info@uecrus.com

Статья поступила в редакцию 18.07.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 18.08.2025.

The article was submitted 18.07.2025; approved and accepted for publication after reviewing 18.08.2025.