

Научная статья

УДК 669.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-14-21

УСТАНОВЛЕНИЕ ПРИЧИН ОБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ТРЕЩИН В ШТАМПОВАННЫХ ДЕТАЛЯХ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Л.В. Морозова¹

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

Аннотация. Проведено комплексное исследование деталей из низкоуглеродистых сталей марок DC04 и DX54D с целью установления причин формирования поверхностных трещин. Методами оптической и электронной микроскопии, химического анализа и металлографии оценена структура, изучены химический состав, строение поверхностных трещин и искусственно полученных изломов деталей. Проведен рентгеноспектральный микроанализ поверхности вскрытых трещин. Установлено снижение пластичности вследствие загрязнения материала деталей неметаллическими включениями.

Ключевые слова: фрактография, трещина, сталь, низкоуглеродистая сталь, разрушение

Для цитирования: Морозова Л.В. Установление причин образования поверхностных трещин в штампованных деталях из низкоуглеродистых сталей // Труды ВИАМ. 2024. № 11 (141). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-14-21.

Scientific article

DETERMINATION OF THE CAUSES OF THE FORMATION OF SURFACE CRACKS IN STAMPED PARTS MADE OF LOW-CARBON STEELS

L.V. Morozova¹

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

Abstract. A comprehensive study of parts made of low-carbon steel grades DC04 and DX54D was carried out in order to establish the causes of the formation of surface cracks using optical and electron microscopy, chemical analysis and metallography, the structure was assessed, the chemical composition, the structure of surface cracks and artificially obtained fractures of parts were studied. An X-ray spectral microanalysis of the surface of the opened cracks was carried out. A decrease in ductility due to contamination of the parts material with non-metallic inclusions has been established.

Keywords: fractography, crack, steel, low-carbon steel, destruction

For citation: Morozova L.V. Determination of the causes of the formation of surface cracks in stamped parts made of low-carbon steels. *Trudy VIAM*, 2024, no. 11 (141), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-11-14-21.

Введение

Низкоуглеродистые стали помимо железа содержат углерод в качестве основного легирующего элемента, при этом его количество не превышает 0,3 %. Другие легирующие элементы либо добавляются в незначительных количествах, либо вовсе не используются [1].

Низкоуглеродистые стали составляют значительную долю всех производимых в настоящее время сталей. Они широко применяются при производстве разнообразных деталей для различных отраслей промышленности: от электронной до судостроительной. Например, в сфере строительства из данных сталей изготавливают арматуру, балки, гвозди, заклепки, швеллеры, уголки и др. Эти стали отличаются хорошей свариваемостью, что позволяет создавать из них разнообразные сварные металлоконструкции и применять различные методы сварки (электро-, газовую, электрошлаковую) при изготовлении деталей, для которых не подходит штампование.

В машиностроительной отрасли низкоуглеродистые стали используют при производстве различного транспорта. Благодаря низкому содержанию углерода эти стали сохраняют структуру при холодном деформировании и прокатке, обладают способностью перераспределять нагрузку, снижая ее в локальных очагах напряжения, тем самым обеспечивают необходимый уровень прочности при высокой пластичности и удобстве формования. Поскольку низкоуглеродистые стали хорошо поддаются холодной штамповке, из них производят рамы, кузовные детали сложной формы и другие компоненты автомобилей и сельскохозяйственной техники. На поверхности деталей из низкоуглеродистых сталей, произведенных методами холодной штамповки, как правило, не наблюдается трещин и надрывов, которые появляются при деформировании сталей с более высоким содержанием углерода. Кроме того, данный тип сталей применяется при изготовлении компонентов бытовой техники, корпусов электронных устройств и бытовых приборов [2].

В нефтегазовой и нефтеперерабатывающей промышленности применяют сталь с содержанием углерода $\leq 0,2\%$, устойчивую к водородному растрескиванию. Для этого расплав подвергают дополнительной очистке от серы и фосфора, получая в итоге однородную сталь без вредных примесей. Из низкоуглеродистой стали производят многокилометровые трубопроводы и сосуды под давлением [3].

К безусловным преимуществам низкоуглеродистых сталей можно отнести низкую стоимость, что делает их экономически привлекательным материалом, позволяет экономить металл и значительно снизить расходы. При этом низкоуглеродистые стали обладают конструкционной прочностью, надежностью, устойчивостью к износу и деформациям. Холодное прессование не вызывает выраженного снижения механической прочности материала [4].

При всех преимуществах низкоуглеродистые стали обладают и рядом недостатков. По сравнению с легированными и высокоуглеродистыми сталями низкоуглеродистые имеют сниженные характеристики прочности при растяжении. В определенных условиях данные стали более подвержены окислению и атмосферной коррозии. В случае необходимости применения низкоуглеродистой стали в условиях агрессивного внешнего воздействия на поверхность листов дополнительно наносят различные защитные покрытия, например цинковые. Жаростойкими данные стали тоже не являются, детали из низкоуглеродистых сталей не рассчитаны на работу в условиях повышенных температур [5].

Несмотря на то что низкоуглеродистые стали находят широкое применение благодаря универсальности и доступности, существует необходимость в разработке и применении более специализированных сталей, отвечающих разным требованиям, таких как коррозионно-, кислото- и жаростойких, с повышенной прочностью и устойчивостью к истиранию. Даже экономное легирование такими доступными элементами, как азот, заметно меняет свойства и улучшает характеристики стали [6–8].

В данной работе рассмотрены две марки стали, применяемые для холодного формования. Сталь DC04 низкоуглеродистая, используется в исходном состоянии при производстве деталей методами холодной штамповки. Сталь DX54D низкоуглеродистая легированная качественная горячеоцинкованная. Зачастую низкоуглеродистые

стали получают путем переработки вторичного сырья (металлолома), поэтому требуется качественная очистка от примесей, неизбежно попадающих в расплав. В свою очередь, к сталям для холодной штамповки предъявляют определенные требования по чистоте металла. Загрязнение стали неметаллическими включениями способно привести к снижению пластичности при деформировании, образованию трещин и надрывов на поверхности производимых деталей [9].

Всесторонняя проверка механических и физических свойств позволяет оценить несущую способность материала, спрогнозировать ресурс, работоспособность и устойчивость к повреждениям произведенных из него деталей, а также обоснованно рекомендовать применение определенного сплава или марки стали в зависимости от условий эксплуатации. Наиболее востребованные методики исследований относятся к области неразрушающего контроля, позволяющего проводить оценку состояния различных деталей и устройств без потери возможности их дальнейшей эксплуатации. Применение неразрушающих методов контроля, таких как люминесцентный и магнитопорошковый, позволяет выявить поверхностные дефекты (надрывы, трещины, питтинги), а также подповерхностные дефектные области и места с повышенными внутренними напряжениями, которые в дальнейшем могут привести к разрушениям и аварийным ситуациям [10].

К щадящим методам исследования также можно отнести измерение твердости, так как индентирование позволяет оценить механические свойства изделия при анализе небольшой области, определить сопротивление небольшим и значительным пластическим деформациям, т. е. данные, аналогичные полученным при определении предела текучести и предела прочности при растяжении соответственно. Зависимости, связывающие твердость с характеристиками прочности и пластичности, позволяют получить подробную информацию о механических свойствах, не нанося при этом значительных повреждений исследуемым деталям. Использование малогабаритных приборов дает возможность измерять твердость изделий как в макро-, так и в микрообъемах непосредственно в процессе эксплуатации [11].

Повышение общей надежности конструкций и сложных технических систем обеспечивается в том числе установлением причин, которые привели к разрушению входящих в них деталей. Это позволяет предусмотреть негативное воздействие различных факторов и принять меры по предотвращению похожих разрушений в дальнейшем [12–14].

В данной работе приведены результаты комплексного исследования деталей, изготовленных из низкоуглеродистых сталей марок DC04 и DX54D.

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

Материалы и методы

При исследовании причин формирования дефектов в виде трещин и надрывов на поверхности деталей из низкоуглеродистых сталей марок DC04 и DX54D в процессе их деформирования проведен анализ технической документации и применены как неразрушающие (люминесцентный), так и разрушающие (металлография, фрактография) методы контроля.

Из оцинкованной стали марки DX54D толщиной 0,65 мм отобраны фрагменты 1–3, из неоцинкованной стали марки DC04 толщиной 0,95 мм – фрагменты 4–6. Фрагменты 1 и 4 получены из партии удовлетворительного качества, без наличия дефектов, в которой не было отбраковки, фрагменты 2, 3, 5 и 6 – из деталей с дефектами (трещинами, надрывами).

Для удаления поверхностных загрязнений перед проведением исследований детали очистили с применением мыльного раствора и мягкой щетки, обезжирили с помощью ацетона особо чистого и высушили сжатым воздухом.

Осмотр дефектных участков при различных увеличениях проводили методами оптической микроскопии с применением конфокального оптического микроскопа. Для проведения металлографического анализа изготовили шлифы в плоскости, расположенной параллельно дефектам. Для выявления микроструктуры поверхность шлифов подвергли травлению водным раствором азотной кислоты.

Провели вскрытие отдельных дефектов. Разрушением при изгибе получены искусственные изломы на исходных листах в продольном и поперечном направлениях, изучено их строение. При выявлении включений в изломе и на поверхности деталей проведен качественный рентгеноспектральный микроанализ.

Металлографический и фрактографический анализ проводили методами электронной микроскопии с применением растрового электронного микроскопа с приставкой для проведения рентгеноспектрального микроанализа.

Люминесцентный контроль осуществляли с применением набора дефектоскопических материалов с особо высоким уровнем чувствительности по ГОСТ 18442–80, обеспечивающим выявление дефектов с минимальной шириной раскрытия 1 мкм и менее.

Химический состав определен экспресс-методом с помощью оптико-эмиссионного спектрометра, содержание серы, фосфора и углерода – с применением газоанализатора по ГОСТ 24018–91, твердость деталей – с помощью твердомера по методу Виккерса.

Результаты и обсуждение Люминесцентный контроль

При проведении капиллярного контроля на поверхности деталей выявлено интенсивное свечение множества индикаторных следов, представляющих собой несплошности в виде трещин, критичные I уровню чувствительности по ГОСТ 18442–80 (ширина раскрытия трещины менее 1 мкм).

Определение химического состава материала деталей

Для анализа отобраны фрагменты из партий, в которых возникли дефекты (металл, при переработке которого была значительная отбраковка по дефекту «неметаллические включения»).

Согласно данным химического анализа, материал деталей не соответствует требованиям нормативной документации для сталей DC04 и DX54D. Наиболее заметное отклонение от химического состава, указанного в стандартах, наблюдается по содержанию кремния, серы и фосфора (см. таблицу).

Химический состав материала деталей из сталей марок DC04 и DX54D

Сталь	Массовая доля элементов *, %					
	C	Mn	Si	Ti	S	P
DC04	<u>0,078</u> <0,08	<u>0,33</u> <0,40	<u>0,600</u> <0,025	–	<u>0,042</u> <0,025	<u>0,039</u> <0,025
DX54D	<u>0,10</u> <0,12	<u>0,55</u> <0,60	<u>0,75</u> <0,50	<u>0,29</u> <0,30	<u>0,050</u> <0,045	<u>0,30</u> <0,10

* Fe – основа.

Примечание. В числителе указаны полученные значения, в знаменателе – в соответствии со стандартами EN 10130:2006 и EN 10346:2015 для сталей DC04 и DX54D соответственно.

Анализ состояния поверхности и изломов в дефектных зонах

Предварительно определили толщину отобранных фрагментов деталей с помощью микрометра с остроконечной насадкой. Измерили толщину прямолинейных участков. В результате измерений выявлено снижение толщины фрагментов деталей из обеих сталей на ~(0,10–0,15) мм.

Методом рентгеноспектрального микроанализа подтверждено наличие цинкового покрытия на поверхности фрагментов деталей из стали DX54D. Толщина покрытия составляет ~20 мкм.

В ходе анализа фрагментов 1 (сталь DX54D) и 4 (сталь DC04) выявлена преимущественно ровная, бездефектная поверхность со следами пластической деформации. В искусственно полученных изломах разрушение прошло внутризеренно с формированием вязкого ямочного рельефа. Вид типичного ямочного рельефа представлен на рис. 1.

На поверхности фрагмента 2 (сталь DX54D) наблюдается дефект в виде трещины. В изломе, полученном после вскрытия трещины, выявлено скопление мелких и крупных частиц (рис. 2). В спектрограммах, снятых с поверхности частиц, присутствуют пики Al и Ca (рис. 3).

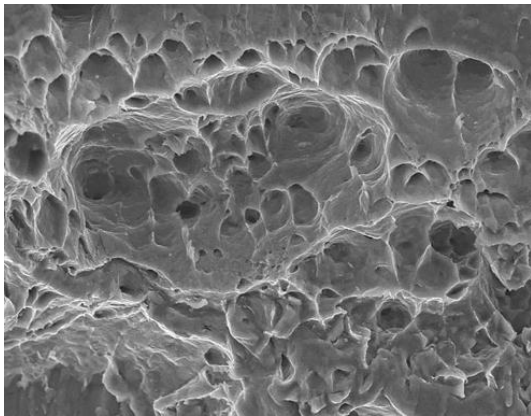


Рис. 1. Ямочный рельеф в искусственно полученном изломе ($\times 2000$)

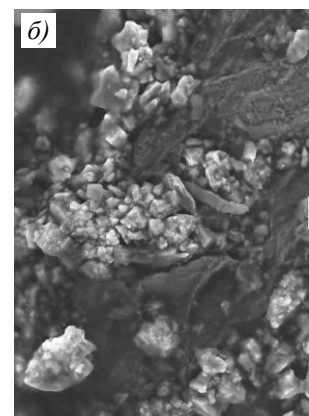
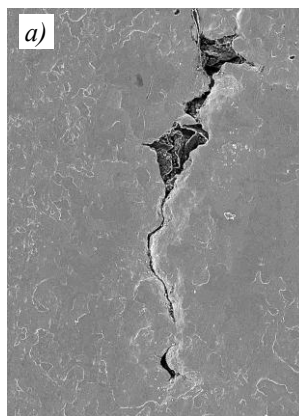


Рис. 2. Трещина на поверхности фрагмента 2 (а, $\times 70$) и частицы в трещине (б, $\times 1000$)

На поверхности фрагмента 3 (сталь DX54D) присутствуют надрывы и следы сдвиговой деформации. В искусственно полученном изломе также наблюдается скопление частиц разного размера. Как показал рентгеноспектральный микроанализ, состав частиц во фрагментах 2 и 3 аналогичен, в спектрограммах, снятых с поверхности частиц, также присутствуют пики Al и Ca (рис. 4).

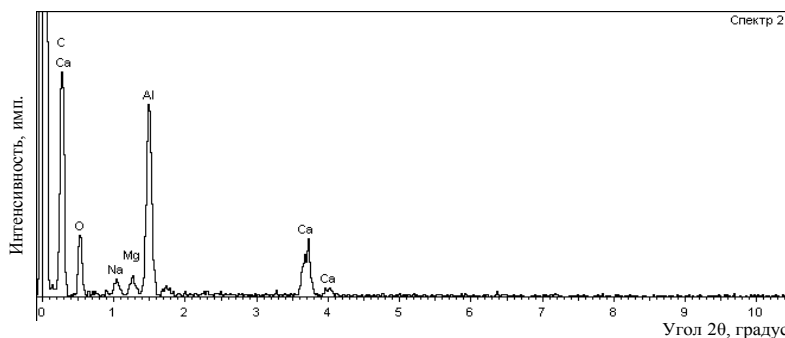


Рис. 3. Спектрограмма частиц в трещине фрагмента 2

На поверхности фрагмента 5 (сталь DC04) наблюдаются повреждение в виде цепочки трещин и складчатый рельеф, характерный для деформации посредством сдвига. В искусственно полученном изломе выявлено скопление мелких и крупных частиц. В спектрограммах, снятых с поверхности частиц, присутствуют пики Al, Ca и Si.

На поверхности фрагмента 6 (сталь DC04) присутствуют надрывы и следы сдвиговой деформации. В искусственно полученном изломе выявлены мелкие и

крупные частицы. В спектрограммах, снятых с поверхности включений, присутствуют пики Al и Si.

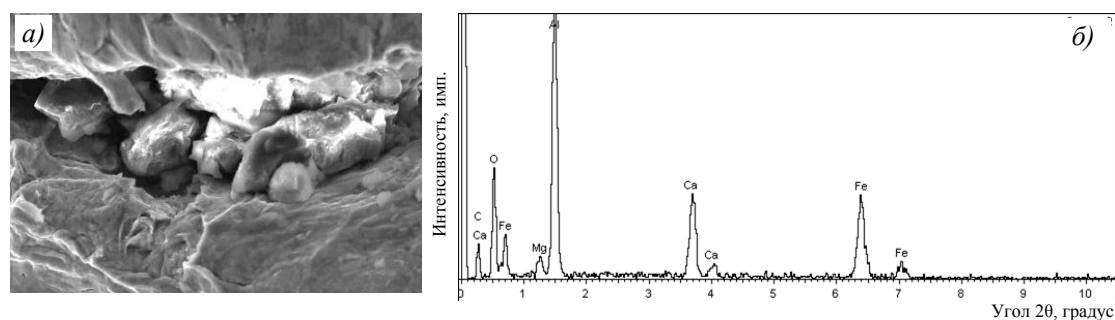


Рис. 4. Скопление частиц в надрыве фрагмента 3 (а, $\times 2000$) и спектрограмма частиц (б)

Металлографическое исследование материала фрагментов 2, 3, 5 и 6, выполненное на продольных шлифах, не подвергнутых травлению, подтвердило наличие многочисленных строчечно расположенных скоплений частиц (рис. 5).

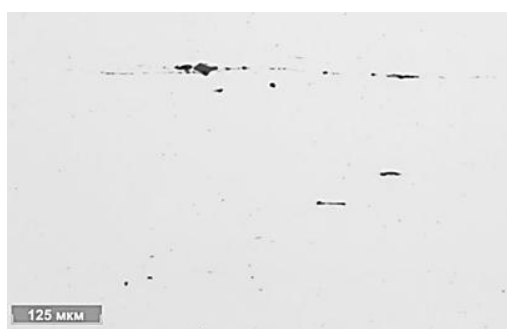


Рис. 5. Строчечно расположенные частицы в материале деталей ($\times 100$)

Микроструктура деталей после травления типичная феррито-перлитная с вытянутыми вследствие холодной деформации зернами, размер которых соответствует 6 баллу. Размер зерна определяли по методике, описанной в ГОСТ 5639–82 [15]. Данный балл зерна рекомендован для сталей, подвергаемых холодной деформации, так как при более крупных зернах на поверхности деталей может формироваться шероховатая поверхность (дефект типа «апельсиновая корка»).

Твердость деталей составляет 90–95 HV, что соответствует пределу прочности 270–350 МПа, согласно стандарту EN 10139:2016.

Заключения

На основании проведенного комплексного исследования установлено, что в химическом составе материала деталей наблюдаются отклонения от требований стандартов EN 10130:2006 (для стали DC04) и EN 10346:2015 (для стали DX54D) по содержанию Al, Ca, Si.

В результате структурных исследований выявлена типичная феррито-перлитная смесь с вытянутыми вследствие холодной деформации зернами, размер которых соответствует 6 баллу. На продольных нетравленных шлифах присутствуют строчечно расположенные скопления неметаллических включений.

С помощью рентгеноспектрального микроанализа установлено, что в дефектных зонах, выявленных на поверхности деталей после холодной деформации, наблюдаются скопления частиц на основе оксидов Al, Ca и Si. Такие же частицы присутствуют в изломах, проходящих перпендикулярно выявленным дефектам и в местах вскрытых дефектов.

Показано снижение толщины фрагментов деталей из обеих сталей в среднем на 0,10–0,15 мм.

Твердость деталей соответствует требованиям стандартов, предъявляемым к данному типу сталей.

Анализ бездефектных фрагментов из обеих сталей показал преимущественно ровную поверхность со следами пластической деформации. В искусственно полученных изломах разрушение пластичное, прошло по механизму ямочного разрыва.

Дефекты в виде надрывов и трещин на поверхности деталей являются следствием наличия скопления частиц на основе оксидов Al, Ca и Si вблизи поверхности. Повышенное загрязнение металла неметаллическими включениями связано с условиями выплавки стали. Использование материала с подобными дефектами для ответственных деталей недопустимо.

Список источников

1. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., перераб. и доп. / под общ. ред. Ю.Г. Драгунова, А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2014. 491 с.
2. Новиков И.И., Золоторевский В.С., Портной К.К. и др. Металловедение: учеб. в 2 т. / под общ. ред. В.С. Золоторевского. М.: ИД МИСИС, 2009. Т. 1. 496 с.
3. Новиков И.И., Золоторевский В.С., Портной К.К. и др. Металловедение: учеб. в 2 т. / под общ. ред. В.С. Золоторевского. М.: ИД МИСИС, 2009. Т. 2. 528 с.
4. 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: 07.06.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-129-142.
5. Гуляев А.П. Металловедение: учеб. для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
6. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // *Тенденции и ориентиры инновационного развития России*. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
7. 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.
8. Севальнев Г.С., Анцыферова М.В., Дульнев К.В., Севальнева Т.Г., Власов И.И. Влияние концентрации азота на структуру и свойства экономнолегированной конструкционной стали // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 2 (59). С. 10–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-10-16.
9. Бернштейн М.Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов: в 2 т. М.: Металлургия, 1968. Т. 1. 596 с.
10. 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: 07.06.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-111-120.
11. Орешко Е.И., Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Уткин Д.А. Методы определения механических характеристик материалов с помощью индентирования (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 07.06.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
12. Гордеева Т.А., Жегина И.П. Анализ изломов при оценке надежности материалов. М.: Машиностроение, 1978. 200 с.
13. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М.: МИСИС, 2007. 259 с.
14. 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.
15. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 21 с.

References

1. *Steel and Alloy Brand Book*. 4th ed., rev. and add. Ed. Yu.G. Dragunov, A.S. Zubchenko. Moscow: Mashinostroenie, 2014, 491 p.
2. Novikov I.I., Zolotarevsky V.S., Portnoy K.K. et al. *Metallurgy*: textbook in 2 vols. Ed. V.S. Zolotarevsky. Moscow: Publ. House MISIS, 2009, vol. 1, 496 p.
3. Novikov I.I., Zolotarevsky V.S., Portnoy K.K. et al. *Metallurgy*: textbook. in 2 vols. Ed. V.S. Zolotarevsky. Moscow: Publ. House MISIS, 2009, vol. 2, 528 p.
4. 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: June 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-129-142.
5. Gulyaev A.P. *Metal Science*: textbook for universities. 6th ed., rev. and add. Moscow: Metallurgiya, 1986, 544 p.
6. Kablov E.N. Key Problem – Materials. *Trends and Guidelines for Innovative Development of Russia*. Moscow: VIAM, 2015, pp. 458–464.
7. 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.
8. Sevalnev G.S., Antsyferova M.V., Dulnev K.V., Sevalneva T.G., Vlasov I.I. Influence of nitrogen concentration on the structure and properties of sparingly alloyed structural steel. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 2 (59), pp. 10–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-2-10-16.
9. Bernstein M.L. *Thermomechanical processing of metals and alloys*: in 2 vols. Moscow: Metallurgiya, 1968, vol. 1, 596 p.
10. 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: June 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-1-111-120.
11. Oreshko E.I., Erasov V.S., Yakovlev N.O., Utkin D.A. Methods for determining the mechanical characteristics of materials using indentation (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 07, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-104-118.
12. Gordeeva T.A., Zhegina I.P. *Analysis of fractures in assessing the reliability of materials*. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 200 p.
13. Klevtsov G.V., Botvina L.R., Klevtsova N.A., Limar L.V. *Fractal diagnostics of destruction of metal materials and structures*. Moscow: MISIS, 2007, 259 p.
14. 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.
15. State Standard 5639–82. *Steels and alloys. Methods of detection and determination of grain size*. Moscow: Publ. House of Standards, 2003, 21 p.

Информация об авторах

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

Information about the authors

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

Статья поступила в редакцию 22.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.08.2024.
The article was submitted 22.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 19.08.2024.