

ISSN 0135-5910 (Print)
ISSN 2619-0753 (Online)

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Бюллетень научно-технической и экономической информации

БЕЛОРЕЦКОМУ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМУ КОМБИНАТУ 260 лет



Ferrous Metallurgy

Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information

Том 78 №6

2022



ISSN 0135-5910 (Print)
ISSN 2619-0753 (Online)

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет (научно-исследовательский университет)»

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

БЮЛЛЕТЕНЬ научно-технической и экономической информации

Журнал включен в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Регистрационный номер ПИ № 77-82438

Издается с 1944 года, ежемесячно

Том 78, № 6

2022

Челябинск,
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

ISSN 0135-5910 (Print)
ISSN 2619-0753 (Online)

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

БЮЛЛЕТЕНЬ научно-технической и экономической информации

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор - СМЕРНОВ Л.А., академик РАН (Российская академия наук, ОАО "Уральский институт металлов", Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)

Зам. главного редактора - ВИННИК Д.А., профессор РАН, д-р. хим. наук (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск)

Зам. главного редактора - БЕССОНОВ А.В., канд. экон. наук (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск)

Зам. главного редактора - ЧУМАНОВ И.В., д-р техн. наук (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск)

Зам. главного редактора - ГАМОВ П.А., канд. техн. наук (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск)

АКСЕЛЬБРОД Л.М., канд. техн. наук (НИТУ «МИСис», г. Москва)

АНДРЕЕВ К.П., канд. техн. наук (Уханьский Университет Науки и Технологии (WUST), Ухань, Китай)

БАБЕНКО А.А., д-р техн. наук (Институт металлургии УрО РАН (ИМет УрО РАН), Екатеринбург)

БАБИЧ А.И., д-р техн. наук (университет Ахена, Германия)

БЕЛОВ В.К., канд. физ.-мат. наук (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)

БРОДОВ А.А., канд. экон. наук (ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П. Бардина", г. Москва)

БЫХОВСКИЙ Л.З., д-р техн. наук (ФГБУ ВИС, г. Москва)

ВЕДЕНЕЕВ А.В., канд. техн. наук (ОАО "Белорусский металлургический завод – управляющая компания холдинга "Белорусская металлургическая компания", г. Жлобин, Республика Беларусь)

ГОРДОН Я.М., д-р техн. наук (фирма Хатч, г. Торонто, Канада)

ДЕНИСОВ С.В., д-р техн. наук (ОАО ММК, г. Магнитогорск)

ДМИТРИЕВ А.Н., д-р техн. наук (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)

ЗОЛОТУХИН Ю.А., канд. техн. наук (АО ВУХИН, г. Екатеринбург)

ЖЕРЕБЦОВ Д.А., д-р. хим. наук (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск)

ИБРАЕВ И.К., д-р техн. наук (Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Республика Казахстан)

КОВАЛЕК АННА, канд. техн. наук (Ченстоховский технологический университет, г. Ченстохова, Польша)

КОЖЕВНИКОВА И.А., д-р техн. наук (Череповецкий государственный университет, г. Череповец)

КОЗЫРЕВ Н.А., д-р техн. наук (Сибирский государственный университет, г. Новокузнецк)

КОСМАЦКИЙ Я.И., д-р. техн. наук (АО "Русский научно-исследовательский институт трубной промышленности", г. Челябинск)

КУЛАКОВ Б.А., д-р. техн. наук (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск)

ЛЯШЕНКО В.И., канд. техн. наук (ГП "УкрНИПИИпромтехнологии", Украина)

МИХАЙЛОВ Г.Г., д-р. техн. наук (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск)

ОРЛОВ Г.А., д-р техн. наук (Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

ПРОТАСОВ А.В., канд. техн. наук (АО АХК ВНИИМЕТМАШ г. Москва)

РОЩИН В.Е., д-р. техн. наук (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», г. Челябинск)

СИДОРОВА Е.Ю., д-р экон. наук (НИТУ «МИСис», г. Москва)

СМЕРНОВ А.Н., д-р техн. наук (Физико-технологический институт металлов и сплавов НАНУ, г. Киев, Украина)

СТОЛЯРОВ А.М., д-р техн. наук (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)

СТРАХОВ В.М., канд. техн. наук (АО ВУХИН, г. Екатеринбург)

ТАНДОН ПУНИТ, д-р философии (технические науки) (Индийский институт информационных технологий, проектирования и производства, Индия, г. Джабалпур)

ФИЛИППОВ Г.А., д-р техн. наук (ФГУП "ЦНИИчермет им. И.П. Бардина", г. Москва)

ФИЛОСΟΦОВА Т.Г., д-р экон. наук (Исследовательский университет "Высшая школа экономики" НИУ ВШЭ), г. Москва)

ФРОЛОВ Ю.А., д-р техн. наук (ООО НПФ "Уралэлектра", г. Екатеринбург)

ХАРИТОНОВ В.А., канд. техн. наук (Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск)

ЧИЖИКОВА В.М., д-р техн. наук (ООО "Управляющая компания "Румелко", г. Москва)

ШЕШУКОВ О.Ю., д-р техн. наук (Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

Ю ХАЙЛЯНГ, д-р философии (технические науки) (Колледж механики и электротехники Центрального Южного университета, г. Чанша, Китай)

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)"

Адрес редакции:

454080, Челябинская обл., г. Челябинск, пр-т Ленина, д. 76

Тел./факс: +7 (351) 267-91-61

e-mail: gamovpa@susu.ru, bessonov@bk.ru

<https://chermetinfo.elpub.ru/jour>

FERROUS METALLURGY

BULLETIN of Scientific, Technical and Economic Information

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief - SMIRNOV L.A., *Academician of RAS (Russian Academy of Sciences, OJSC "Ural'sky Institute of Metals", Institute of Metallurgy Ural Branch of RAS, Ekaterinburg)*

Deputy Editor-in-Chief - VINNIK D.A., *Professor of RAS, HD (Chem) (FSAEIHE SUSU (NRU), Chelyabinsk)*

Deputy Editor-in-Chief - BESSONOV A.V., *PhD (Econ) (FSAEIHE SUSU (NRU), Chelyabinsk)*

Deputy Editor-in-Chief - CHUMANOV I.V., *HD (Tech) (FSAEIHE SUSU (NRU), Chelyabinsk)*

Deputy Editor-in-Chief - GAMOV P.A., *PhD (Tech) (FSAEIHE SUSU (NRU), Chelyabinsk)*

AKSELROD L.M., *PhD (Tech) (National Research technological University "MISiS", Moscow)*

ANDREEV K.P., *PhD (Tech.) (Wuhan University of Science and Technology (WUST), Wuhan, China)*

BABENKO A.A., *HD (Tech) (Institute of metallurgy Uro RAN (IMet Uro RAN), Ekaterinburg)*

BABICH A.I., *HD (Tech) (Aachen University, Germany)*

BELOV V.K., *PhD (Phys and Mathematic) (Magnitogorsk State technical University after G.I. Nosov, Magnitogorsk)*

BRODOV A.A., *PhD (Econ) (FGUP "CNIChermert after I.P. Bardin", Moscow)*

BYKHOVSKY L.Z., *HD (Geo and Mineral) (FGBU VIMS, Moscow)*

VEDENEEV A.V., *PhD (Tech) (OJSC "Balarus' steel-works – Managing company of Holding "Belarus' metallurgical company", Zhlobin, Balarus')*

GORDON Ya.M., *HD (Tech) (Hutch, Toronto, Canada)*

DENISOV S.V., *HD (Tech) (OJSC MMK, Magnitogorsk)*

DMITRIEV A.N., *HD (Tech) (Institute of Metallurgy Ural branch of RAS, Ekaterinburg)*

ZOLOTUKHIN Yu.A., *PhD (Tech) (JSC VUKHIN, Ekaterinburg)*

ZHEREBTSOV D.A., *HD (Chem) (FSAEIHE SUSU (NRU), Chelyabinsk)*

IBRAEV I.K., *HD (Tech) (Eurasia National University after L.N. Gumilev, Astana, Republic of Kazakhstan)*

KAWALEK ANNA, *PhD (Tech.) (Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland)*

KOZHEVNIKOVA I.A., *HD (Tech) (Cherepovets State University, Cherepovets)*

KOZYREV N.A., *HD (Tech) (Siberian State University, Novokuznetsk)*

KOSMATSKY Ya.I., *HD (Tech) (JSC "Russia Research and development Institute of Pipe Industry", Chelyabinsk)*

KULAKOV B.A., *HD (Tech) (FSAEIHE SUSU (NRU), Chelyabinsk)*

LYASHENKO V.I., *PhD (Tech) (GP "UkrNIPiPromtehnologii", Ukraine)*

MIKHAILOV G.G., *HD (Tech) (FSAEIHE SUSU (NRU), Chelyabinsk)*

ORLOV G.A., *HD (Tech) (Ural Federal University after the First President of Russia B.N. El'tsin, Ekaterinburg)*

PROTASOV A.V., *PhD (Tech) (JSC AKhK BNIIMET-MASH, Moscow)*

ROSHCHIN V.E., *HD (Tech) (FSAEIHE SUSU (NRU), Chelyabinsk)*

SIDOROVA E.Y., *HD (Econ.) (National Research Technological University "MISiS", Moscow)*

SMIRNOV A.N., *HD (Tech) (Physico-Technology Institute of Metals and Alloys of NANU, Kiev, Ukraine)*

STOLYAROV A.M., *HD (Tech) (Magnitogorsk State technical University after G.I. Nosov, Magnitogorsk)*

STRAKHOV Yu.A., *PhD (Tech) (JSC VUKHIN, Ekaterinburg)*

PUNEET TANDON, *PhD (Indian Institute of Information Technology, Design and Manufacturing, Jabalpur, India)*

FILIPPOV G.A., *HD (Tech) (FGUP "CNIChermert after I.P. Bardin", Moscow)*

FILOSOFOVA T.G., *HD (Econ.), (Research University "The Highest School of Economics" – NIU VShE, Moscow)*

FROLOV Yu.A., *HD (Tech) (OJSC NPP "Uralelectra", Ekaterinburg)*

KHARITONOV V.A., *PhD (Tech) (Magnitogorsk State Technical University after G.I. Nosov, Magnitogorsk)*

CHIZHIKOVA V.M., *HD (Tech) (OJSC "Managing Company "Rumelco", Moscow)*

SHESHUKOV O.Yu., *HD (Tech) (Ural Federal University after the First President of Russia B.N. El'tsin, Ekaterinburg)*

STOLYAROV A.M., *HD (Tech) (Magnitogorsk State technical University after G.I. Nosov, Magnitogorsk)*

YU HAILIANG, *PhD (Tech.) (College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha, China)*

Founders: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
"South Ural State University (national research university)"

Editorial Addresses: 76, Lenin Avenue, Chelyabinsk, Russia, 454080

Tel/fax: +7 (351) 267-91-61

e-mail: gamovpa@susu.ru, bessonov@bk.ru

<https://chermetinfo.elpub.ru/jour>

СОДЕРЖАНИЕ

НА ПРЕДПРИЯТИЯХ И В ИНСТИТУТАХ

Аглодомненное производство

- Буткарев А.А., Буткарева Е.А.* Исследование тепло-технических схем обжиговых машин ОК-520 Михайловского ГОКа с использованием методологии ВНИИМТ для повышения их эффективности 487
- Травянов А.Я., Калинин А.С.* Изменение прочности и восстановимости железорудных агломератов при увеличении показателя основности 496

Прокатное производство

- Кожевникова И.А., Быков А.В., Жиленко С.В., Смирнов А.С.* Формирование деформационных режимов при прокатке металла на широкополосных станах 502
- Полевой Е.В., Козырев Н.А., Михно А.Р., Чумачков И.И., Шевченко Р.А.* Влияние способов обработки образцов рельсов категории ДТ350 из стали 76ХФ на величину ударной вязкости 508
- Лях А.П., Колесников А.Г., Филатов А.А.* Анализ конструкций роликов проходных печей прокатных станов 516

Трубное производство

- Лицин К.В., Макаров Я.В.* Разработка цифрового двойника промышленного робота-манипулятора Motoman MH-50 для выполнения сварочных операций сложных конструкций 522

Металлургическое оборудование и литейное производство

- Полухин Д.С., Гойхенберг Ю.Н., Бодров Е.Г., Кочнев П.В.* Зависимость физико-механических свойств Ni-P-покрытия от режима термической обработки и формируемого фазового состава 529
- Каляскин А.В., Кулаков Б.А., Токарев А.А., Бакин И.В.* Подготовка расплава чугуна к модифицированию путем рафинирующей обработки в печи 536
- Шабурова Н.А., Пашикев И.Ю.* Влияние условий совместного насыщения стали хромом и никелем на глубину диффузионного слоя 542

Экология и ресурсосбережение

- Аксенов В.И., Царев Н.С.* Подготовка к утилизации осадков общезаводских очистных сооружений производственных сточных вод 549
- Гольцев В.А., Дудко В.А., Киселев Е.В., Лебедь А.Б.* Исследование аэродисперсной системы рабочей зоны ферросплавного цеха 553

Книжная полка

- Модернизация оборудования и реконструкция заводов черной металлургии за рубежом** 563

ЭКСПРЕСС-ИНФОРМАЦИЯ

- Статистика** 576

CONTENTS

AT ENTERPRISES AND IN INSTITUTES

Sintering and Blast Furnace Processes

- Butkarev A.A., Butkareva E.A.* Study of the heat engineering schemes of the OK-520 firing machines at Mikhailovskiy GOK using VNIIMT's methodology to improve their efficiency 487
- Travyanov A.Ya., Kalinin A.S.* Changes in strength and reducibility of iron ore sinters with increasing basicity 496

Rolling Mill Practice

- Kozhevnikova I.A., Bykov A.V., Zhilenko S.V., Smirnov A.S.* Formation of deformation modes during metal rolling in broadband mills 502
- Polevoi E.V., Kozyrev N.A., Mikhno A.R., Chumachkov I.I., Shevchenko R.A.* Effect of machining on impact toughness value of rail samples DT350 from steel grade 76XΦ 508
- Lyakh A.P., Kolesnikov A.G., Filatov A.A.* Analysis of design of the rollers of through furnaces of rolling mills 516

Production of Pipes and Tubes

- Litsin K.V., Makarov Ya.V.* Development of a digital twin of Motoman MH-50 industrial robot-manipulator for welding operations of complex structures 522

Metallurgical equipment and foundry practice

- Polukhin D.S., Goikhenberg Yu.N., Bodrov E.G., Kochnev P.V.* Dependence of physical and mechanical properties of Ni-P-coating on the heat treatment mode and the formed phase composition 529
- Kalyaskin A.V., Kulakov B.A., Tokarev A.A., Bakin I.V.* Preparation of molten cast iron for modification by means of refining treatment in the furnace 536
- Shaburova N.A., Pashkeev I.Yu.* Effect of the joint saturation conditions of steel with chromium and nickel on the diffusion layer depth 542

Ecology and Resource-Saving

- Aksenov V.I., Tsarev N.S.* Preparation for the disposal of sludge from the industrial wastewater treatment plants 549
- Gol'tsev V.A., Dudko V.A., Kiselev E.V., Lebed' A.B.* Study of aero-dispersion system in the ferroalloy workshop working area 553

Bookshelf

- Modernization of Equipment and Reconstruction of the Steel works abroad** 563

EXPRESS INFORMATION

- Statistics** 576

ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ ОБРАЗЦОВ РЕЛЬСОВ КАТЕГОРИИ ДТ350 ИЗ СТАЛИ 76ХФ НА ВЕЛИЧИНУ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ

*Е. В. ПОЛЕВОЙ¹, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского отдела;
Н. А. КОЗЫРЕВ², д-р техн. наук, профессор, заместитель директора научного центра качественных сталей;
А. Р. МИХНО³, аспирант, директор НПЦ «Сварочные процессы и технологии», mikno-mm131@mail.ru;
И. И. ЧУМАЧКОВ³, магистрант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства;
Р. А. ШЕВЧЕНКО³, канд. техн. наук, преподаватель кафедры металлургии черных металлов
(¹ АО «ЕВРАЗ ЗСМК», Россия, г. Новокузнецк; ² ГНЦ ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», Россия, г. Москва;
³ Сибирский государственный индустриальный университет, Россия, г. Новокузнецк)*

Аннотация. Известно, что величина ударной вязкости чувствительна к геометрической точности изготовления, качеству поверхности и концентратора образцов на ударный изгиб. Особенно большое влияние данные параметры оказывают на образцы из высокоуглеродистых материалов. В настоящее время основным нормативным документом для изготовления образцов на ударный изгиб служит ГОСТ 9454–78, который не регламентирует способ нанесения концентраторов. Для нанесения концентратора применяют способы протяжки, фрезерования и электроэрозионной обработки. Вопрос о влиянии способов обработки на величину ударной вязкости, в частности рельсовой стали, до конца не изучен. С целью исследования влияния электроэрозионной обработки на величину ударной вязкости изготовили образцы рельса Р65 категории ДТ350 из стали 76ХФ текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК» с применением фрезерного станка с ЧПУ и электроэрозионной обработки. Установлено, что снижение значений ударной вязкости образцов, изготовленных с применением электроэрозионной обработки, обусловлено мартенситом, выделившимся при локальном оплавлении металла, и цветными металлами (Cu и Zn), выделившимися при обработке. В процессе работы электроэрозионного станка образуется неравномерная поверхность, когда дуга локально выбивает «лунки», являющиеся дополнительными концентраторами напряжений при испытании на ударный изгиб. Нанесение концентратора фрезерным станком приводит к образованию деформированного слоя глубиной до 80 мкм, который не является концентратором напряжений и не снижает ударную вязкость рельсовой стали. В рамках продолжения исследований планируется изучить влияние нанесения концентратора методом протяжки на величину ударной вязкости.

Ключевые слова: рельсы, прочностные свойства, ударная вязкость, электроэрозионная обработка, микроструктура, макроструктура.

Ссылка для цитирования: Полевой Е.В., Козырев Н.А., Михно А.Р., Чумачков И.И., Шевченко Р.А. Влияние способов обработки образцов рельсов категории ДТ350 из стали 76ХФ на величину ударной вязкости // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2022. Т. 78. № 6. С. 508-515.

Doi: 10.32339/0135-5910-2022-6-508-515

EFFECT OF MACHINING ON IMPACT TOUGHNESS VALUE OF RAIL SAMPLES DT350 FROM STEEL GRADE 76ХФ

*E. V. POLEVOI¹, PhD (Tech.), Head of Research Department; N. A. KOZYREV², HD (Tech.), Professor,
Deputy Director of the Scientific Center of High-Quality Steels; A. R. MIKHNO³, Postgraduate Student,
Director of the NPC "Welding Processes and Technologies", mikno-mm131@mail.ru;
I. I. CHUMACHKOV³, Undergraduate, Department of Materials Science, Foundry and Welding Production;
R. A. SHEVCHENKO³, PhD (Tech.), Lecturer of the Department of Metallurgy of Ferrous Metals
(¹ JSC EVRAZ ZSMK, Russia, Novokuznetsk; ² SSC FSUE "TsNIIchermet named after I.P. Bardin",
Russia, Moscow; ³ Siberian State Industrial University, Russia, Novokuznetsk)*

Abstract. It is known that the value of impact toughness is sensitive to the geometric accuracy of manufacturing, the quality of the surface and concentrator of samples for impact bending. These parameters have a particularly strong influence on samples made of high-carbon materials. At present, the main regulatory document for the manufacture of samples for impact bending is GOST 9454–78, which does not regulate the method of applying concentrators. Currently, methods of drawing, milling and electroerosion processing are used to apply the concentrator. The issue of the influence of processing methods on the magnitude of impact strength, in particular rail steel, has not been fully studied. To study the effect of electroerosion processing on impact toughness value we made specimens of P65 rail of DT350 category from 76ХФ steel of current EVRAZ ZSMK production using CNC milling machine and electroerosion processing. It has been established that the decrease in the values of impact strength of samples made using electroerosive machining was due to martensite released during local melting of the metal and non-ferrous metals (Cu and Zn) released during processing. During the operation of the electroerosion processing machine, an uneven surface was formed when the arc locally knocked out "holes", which serve as additional stress concentrators during impact bending tests. The application of the

concentrator by a milling machine leads to the formation of a deformed layer up to 80 μm deep, which is not a stress concentrator and does not reduce the impact strength of the rail steel. As part of a further study, it is planned to investigate the effect of the application of the concentrator by the pulling method on the value of the impact toughness.

Keywords: rails, strength properties, impact toughness, electroerosion processing, microstructure, macrostructure.

For citation: Polevoi E.V., Kozyrev N.A., Mikhno A.R., Chumachkov I.I., Shevchenko R.A. Effect of machining on impact toughness value of rail samples DT350 from steel grade 76ХФ. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2022, vol. 78, no. 6, pp. 508-515. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2022-6-508-515

Рост объемов грузоперевозок железнодорожным транспортом, внедрение в обращение инновационных вагонов с увеличенными до 27 т нагрузками на ось, увеличение веса и интенсивности движения поездов [1] обуславливают новые, более высокие требования к качественным характеристикам элементов верхнего строения железнодорожного пути, важнейшим из которых являются рельсы [2, 3]. Помимо повышения в целом комплекса физико-механических свойств, отдельной важной задачей является обеспечение стабильности и достоверности результатов испытаний, зависящих, в свою очередь, не только от качества металла, но и от способов изготовления образца. Среди параметров, определяемых при оценке качества высокоуглеродистых железнодорожных рельсов по ГОСТ Р 51685–2013, наиболее значительное влияние на величину ударной вязкости оказывают способ и метод изготовления образцов. При испытании на ударный изгиб рассчитывают работоспособность металла и стойкость его к разрушению в условиях динамического нагружения при комнатной (для рельсов общего назначения) и отрицательной (для рельсов низкотемпературной надежности) температурах [4, 5].

Известно, что образцы при испытании на ударный изгиб чувствительны к месту вырезки, геометрической точности изготовления, качеству поверхности образца и концентратора [6–12]. Вместе с этим требования к месту вырезки из рельсов и качеству образцов на ударный изгиб, указанные в ГОСТ Р 51685–2013 [13] и ГОСТ 9454–78 [14], могут быть реализованы различными технологиями и вносить существенную нестабильность в результаты измерений. Например, согласно п. 7.11.2 ГОСТ Р 51685–2013 [13] «заготовки для изготовления образцов на ударный изгиб вырезают из головки проб из зоны выкружки возможно ближе к поверхности катания вдоль направления прокатки». Такая формулировка позволяет осуществлять вырезку в широком секторе по сечению головки рельсов, в котором может существенно меняться и доля зернограничного феррита, и дисперсность перлита, и величина перлитных колоний, т. е. те параметры, которые оказывают большое влияние на сопротивление хрупкому разрушению при динамическом нагружении. В ГОСТ 9454–78 требования к допускам по геометрическим размерам и радиусу

концентратора тоже находятся в довольно широких допусках, которые оказывают влияние на вариативность получаемых результатов. Современные станки с числовым программным управлением (ЧПУ) позволяют более строго регламентировать процесс изготовления образцов с точным позиционированием и высокой точностью. Для повышения достоверности и обеспечения единства результатов измерений специалистами АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при разработке новой версии ГОСТ Р 51685 предложено регламентировать место вырезки (рис. 1) и ужесточить допуски на геометрические размеры ударных образцов типа I следующими дополнениями:

- радиус концентратора R — $1 \pm 0,05$ мм;
- угол между осью концентратора и осью образца A — 90 ± 1 град.;
- угол между гранями A_1 — 90 ± 1 град.;
- параметр шероховатости — $Rz10$.

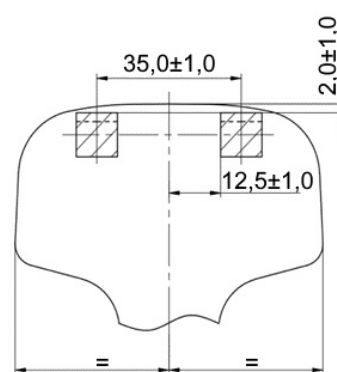


Рис. 1. Предлагаемая схема вырезки образцов на ударный изгиб

Fig. 1. Proposed cutting pattern for impact bending samples

Среди способов нанесения концентратора на образцы в настоящее время распространены следующие: протяжка, фрезерование, электроэрозионная обработка. Последний способ все чаще применяется для изготовления эталонных образцов. Тем не менее влияние каждого из способов на результаты испытаний, в частности при оценке свойств рельсовой стали, не изучено.

Целью настоящей работы является сравнительное исследование влияния электроэрозионной и фрезерной обработки при изготовлении U-образного концентратора на величину ударной вязкости металла рельсов категории ДТ350 из стали 76ХФ.

Материалы и методы исследования

Объект исследования — образцы на ударный изгиб типа I по ГОСТ 9454–78, вырезанные с помощью фрезерного станка VF3 с ЧПУ из рельса Р65 категории ДТ350 из стали 76ХФ текущего производства АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Выбор материала исследования обусловлен тем, что рельсы категории ДТ350 общего назначения серийно поставляются в адрес ОАО «РЖД» и

имеют наиболее протяженный полигон укладки из всех категорий дифференцированно термоупрочненных рельсов.

На четном номере каждой пары образцов нанесен U-образный концентратор, выполненный методом электроэрозионной обработки на станке AgieCharmilles CUT E 600. На остальных образцах U-образный концентратор нанесен по текущей технологии с применением фрезерного станка VF3 методом фрезерования (рис. 2).

Станок с ЧПУ

Обр. № 1	Обр. № 3	Обр. № 5	Обр. № 7	Обр. № 9	Обр. № 11	Обр. № 13	Обр. № 15	Обр. № 17	Обр. № 19
Поверхность катания головки									
Обр. № 2	Обр. № 4	Обр. № 6	Обр. № 8	Обр. № 10	Обр. № 12	Обр. № 14	Обр. № 16	Обр. № 18	Обр. № 20

Электроэрозионный станок

Рис. 2. Схема разметки пробы

Fig. 2. Sample marking scheme

Результаты исследования и их обсуждение

Испытания на ударный изгиб проводили в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51685–2013 при температуре испытания +20 °С на маятниковом копре РКР-450 с энергией удара 150 Дж. Результаты испытаний представлены в таблице и на рис. 3.

Из представленных результатов испытаний видно, что значения ударной вязкости образцов, концентраторы которых изготовлены на фрезерном станке, находятся на более высоком уровне

(25–41 Дж/см²) по сравнению с образцами, на которых концентраторы были нанесены электроэрозионным способом (18–34 Дж/см²), в среднем на 8,8 Дж/см² (29,4 %).

В 8 случаях из 10 парное значение ударной вязкости было выше на 6–21 Дж/см² в образцах с концентратором, изготовленным фрезерованием. Значения стандартного отклонения для обеих выборок находятся на сопоставимом уровне, что свидетельствует о высокой репрезентативности сравнительных испытаний.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ОБРАЗЦОВ

MAIN RESULTS OF SAMPLE TESTS

Нанесение концентратора фрезерованием (1)		Нанесение концентратора электроэрозионным способом (2)		Разница между результатами испытаний (1) и (2)
номер образца	ударная вязкость, Дж/см ²	номер образца	ударная вязкость, Дж/см ²	
1	39	2	18 ↓	21
3	40	4	34 ↓	6
5	27 ↓	6	33	–6
7	34	8	23 ↓	11
9	36	10	25 ↓	11
11	38	12	32 ↓	6
13	41	14	33 ↓	8
15	25 ↓	16	34	–9
17	39	18	33 ↓	6
19	38	20	34 ↓	4
Минимум	25	Минимум	18	6
Максимум	41	Максимум	34	21
Среднее	35,7	Среднее	29,9	8,8
Стандартное отклонение	5,49	Стандартное отклонение	5,74	—

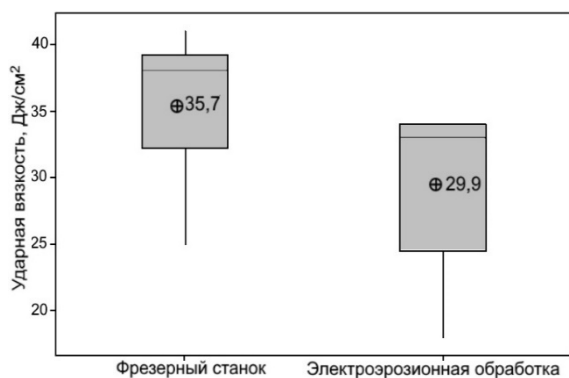


Рис. 3. Сравнение результатов испытаний на ударный изгиб образцов с U-образными концентраторами, нанесенными фрезерованием и электроэрозионным способом

Fig. 3. Comparison of impact bending test results of samples with U-shaped concentrators applied by milling and electroerosion processing

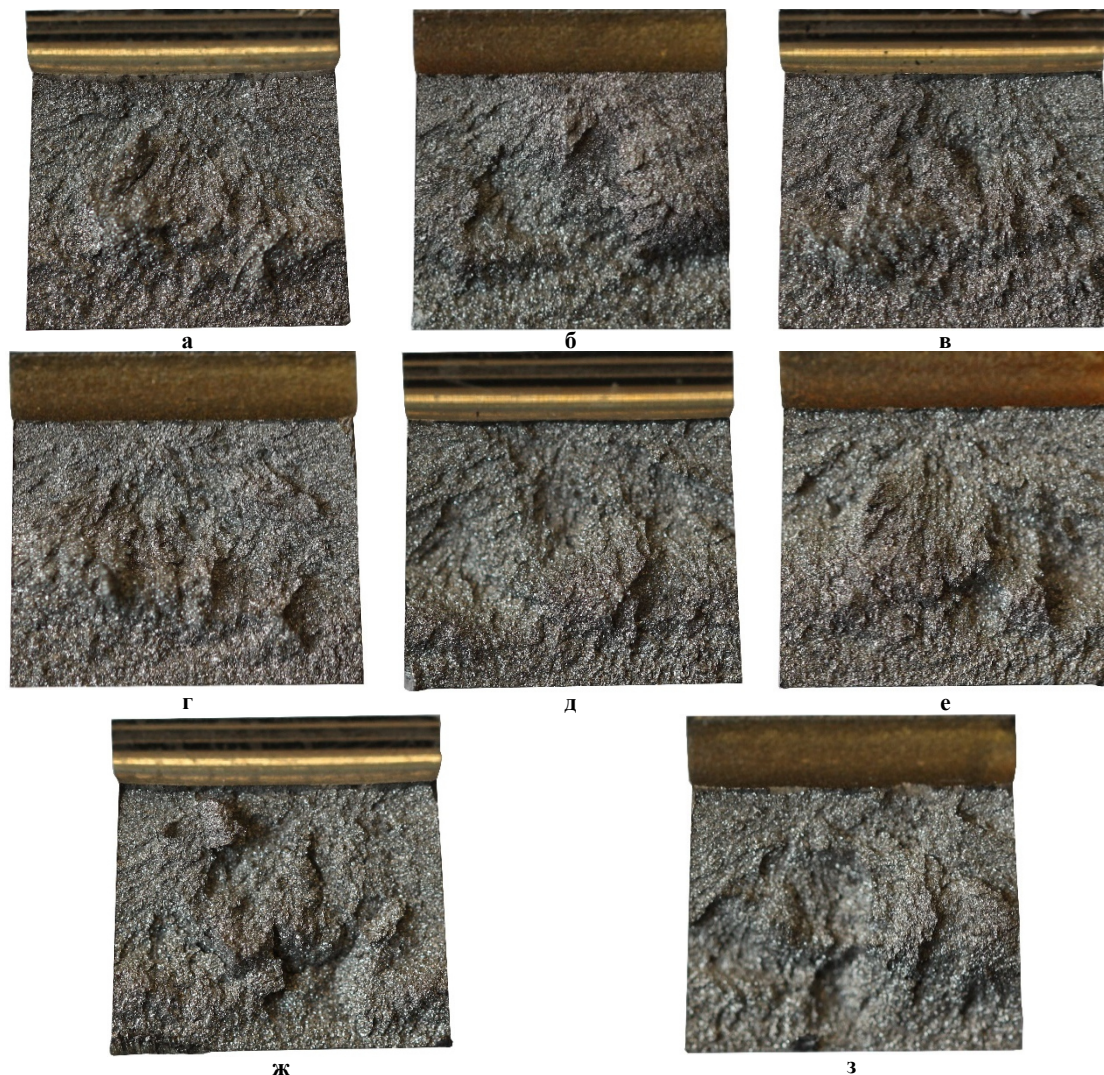


Рис. 4. Поверхность образцов после испытаний на ударный изгиб:
а — образец № 1 — 39 Дж/см²; б — образец № 2 — 18 Дж/см²; в — образец № 7 — 34 Дж/см²;
г — образец № 8 — 23 Дж/см²; д — образец № 15 — 25 Дж/см²; е — образец № 10 — 25 Дж/см²;
ж — образец № 13 — 41 Дж/см²; з — образец № 4 — 34 Дж/см²

Fig. 4. Sample surface after impact bending tests:
а — sample No. 1 — 39 J/cm²; б — sample No. 2 — 18 J/cm²; в — sample No. 7 — 34 J/cm²; г — sample No. 8 — 23 J/cm²;
д — sample No. 15 — 25 J/cm²; е — sample No. 10 — 25 J/cm²; ж — sample No. 13 — 41 J/cm²; з — sample No. 4 — 34 J/cm²

Низкие значения коэффициента корреляции между двумя выборками ($-0,145$) свидетельствуют об отсутствии взаимосвязи между парными значениями.

Для исследования причин получения различных значений твердости проведен фрактографический анализ поверхностей излома образцов № 1, 2, 4, 7, 8, 10, 13, 15 (рис. 4).

Образцы отбирали по следующим критериям: максимальная разница между значениями (№ 1, 2), минимальные (№ 2, 15) и максимальные (№ 4, 13) для каждого способа нанесения концентратора значения, а также сопоставимые значения (№ 4, 7 и № 8, 10, 15) ударной вязкости.

Поверхность всех изломов мелкокристаллическая, характерная для хрупкого разрушения. В узком объеме материала по кромке концентраторов, прилегающих к поверхности разрушения, наблюдается тонкий слой локальной деформации, в поперечном сечении — трапецевидность излома со следами пластической деформации (утяжки) в зоне сопряжения боковых граней и концентратора. Более выраженная трапецевидность присутствует у образцов с более высокими значениями ударной вязкости (№ 1, 4, 13), в то время как у образца с минимальными значениями

(№ 2) практически квадратное сечение с минимальной деформацией. Образцы на ударный изгиб, приготовленные по текущей технологии, имеют сплошной темный слой. В образцах, приготовленных с применением электроэрозионной обработки, темный слой местами прерывается.

Кроме того, поверхность изломов и концентраторов исследовали на электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMH, оснащенный системой энергодисперсионного анализа X-Max 20.

Анализ поверхности по месту разрушения пробы на ударный изгиб показал, что в среднем фокус излома образцов с концентратором, изготовленным методом фрезерования, расположен на глубине ~ 950 мкм ($0,1$ мм), в то время как разрушение образцов, изготовленных с применением электроэрозионного станка, начинается от поверхности концентратора. Неметаллических включений в зоне начала изломов не обнаружено.

На поверхности образцов с концентратором напряжений, нанесенным с применением метода электроэрозионной обработки, выявлено осаждение цветных металлов (Cu и Zn), оставшихся на поверхности после обработки грани концентратора импульсными дугowymi разрядами латунной проволокой (рис. 5).

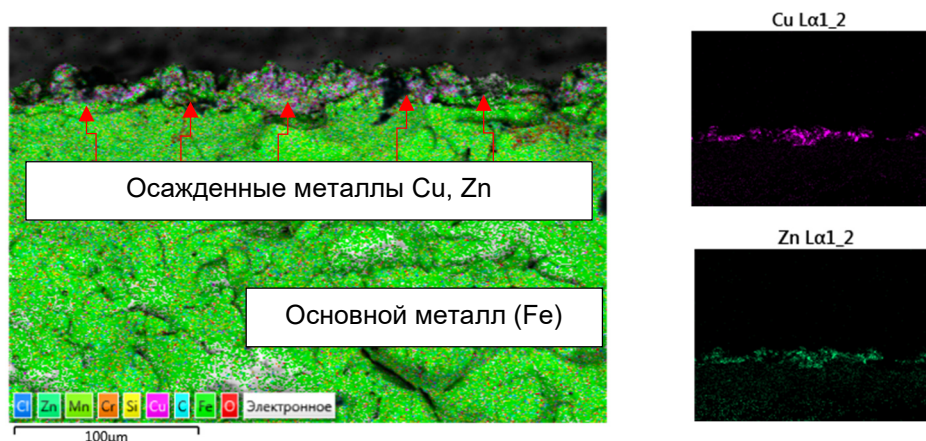


Рис. 5. Многослойная карта ЭДС по месту разрушения образца № 7

Fig. 5. Multilayer EMF map at the sample destruction site (No. 7)

На границе раздела между основным металлом и гранью концентратора, нанесенного методом электроэрозионной обработки, обнаружена оплавленная поверхность и светлотравящийся слой с игольчатой структурой мартенсита (рис. 6, а, в). По месту концентраторов, канавка которых нанесена с использованием фрезерного станка, наблюдается слой наклепанного металла глубиной до 80 мкм, по кромке структура деформированная, пластины цементита поломаны, светлотравящийся слой отсутствует (см. рис. 6, з, д).

Представленные результаты свидетельствуют о том, что нанесение концентратора электроэрозионным способом оказывает суще-

ственное негативное влияние на величину ударной вязкости и способствует зарождению первоначальной трещины за счет формирования микрорельефа («лунок») с наличием осажденных металлов или формирования хрупких закалочных структур типа мартенсита. В последнем случае наблюдается наиболее сильное влияние на снижение уровня величины ударной вязкости. Деформированная структура, образующаяся на поверхности концентратора при нанесении его методом фрезерования, оказывает меньшее влияние и не является концентратором напряжений при проведении испытаний, о чем свидетельствует расположение фокуса излома на расстоянии ~ 1 мм от поверхности U-образного концентратора.

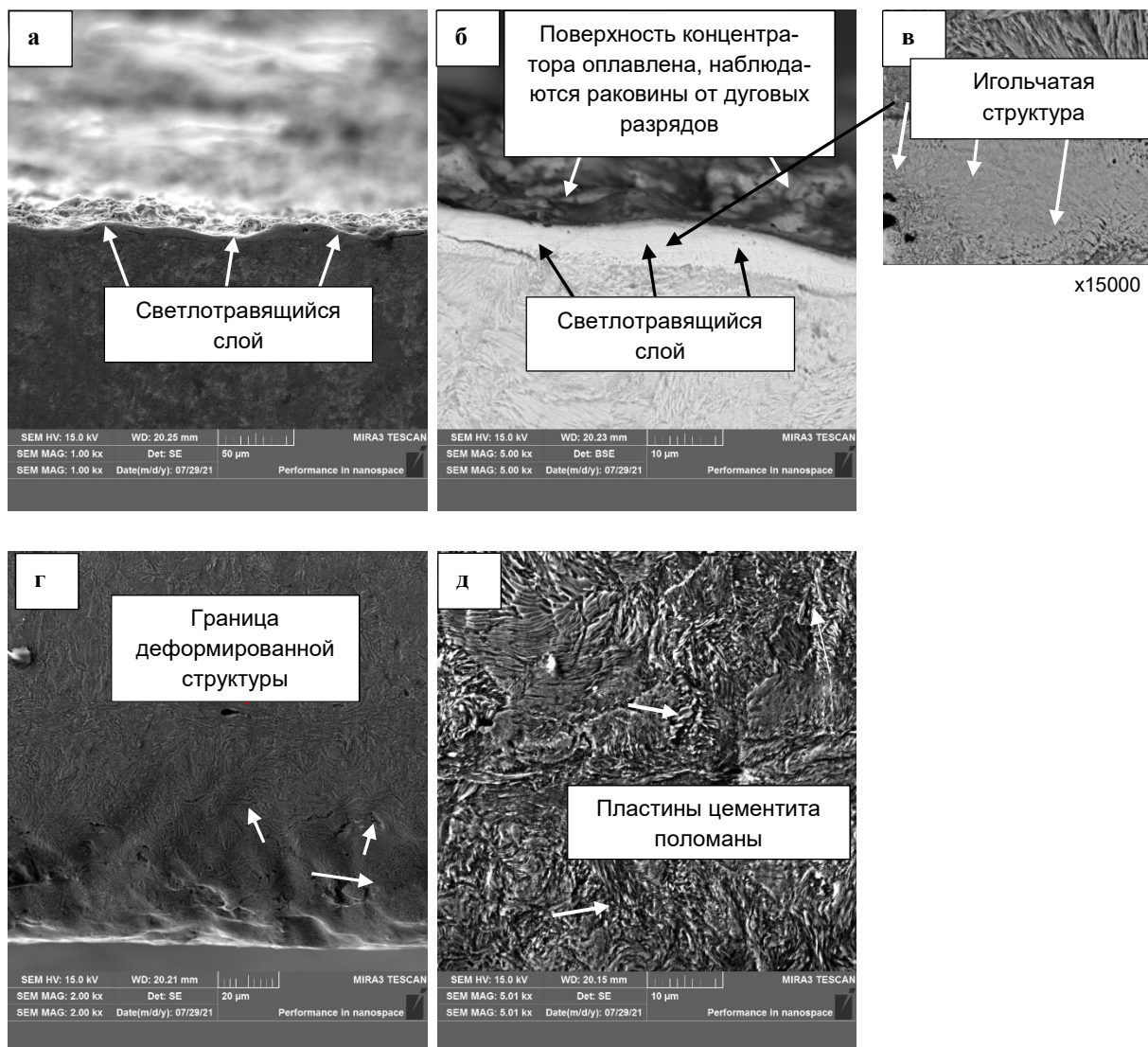


Рис. 6. Исследование поверхности изломов и концентраторов на сканирующем электронном микроскопе:
 а, б, в — образец № 2, концентратор нанесен электроэрозионным способом;
 г, д — образец № 1, концентратор нанесен фрезерованием

Fig. 6. Examination of fracture and concentrator surface using a scanning electron microscope:
 а, б, в — sample No. 2, the concentrator was made by electroerosion processing; г, д — sample No. 1, the concentrator was milled

Выводы

Сравнительные исследования влияния электроэрозионной обработки и фрезерования при нанесении U-образного концентратора на результаты испытаний ударной вязкости рельсов категории ДТ350 из стали 76ХФ позволили сделать следующие выводы.

1. Значения ударной вязкости образцов, концентраторы которых изготовлены на фрезерном станке, находятся на более высоком уровне (25–41 Дж/см²) по сравнению с образцами, на которых концентраторы были нанесены электроэрозионным способом (18–34 Дж/см²), в среднем на 8,8 Дж/см² (29,4 %).

2. Параметр стандартного отклонения для двух выборок находится на сопоставимом

уровне. Вероятность достоверности полученных измерений считается высокой.

3. Излом всех образцов мелкокристаллический хрупкий. По мере повышения значений ударной вязкости в изломе образцов наблюдается рост пластической деформации, выраженный в увеличении степени трапецевидности излома.

4. Фокус излома образцов с концентратором, нанесенным фрезерованием, расположен на глубине ~950 мкм от поверхности концентратора, в то время как образцы, изготовленные с применением электроэрозионной обработки, разрушаются от поверхности концентратора, от участков мартенсита или участков, обогащенных цветными металлами (Cu и Zn), оставшимися на поверхности после обработки грани концентратора импульсными дуговыми разрядами

латунной проволокой. Присутствие неметаллических включений в зоне зарождения трещин не обнаружено.

Таким образом, способ нанесения концентратора оказывает существенное влияние на величину ударной вязкости. Применение электроэрозионной обработки приводит к образованию закалочных структур и участков, обогащенных цветными металлами, которые облегчают зарождение трещины и приводят к снижению величины ударной вязкости, что критически важно при подготовке образцов из высокопрочных углеродистых сталей, имеющих высокую температуру

вязкохрупкого перехода и при комнатных температурах, разрушающихся по хрупкому механизму. Метод фрезерования способствует образованию деформированной структуры с поверхности в области концентратора на глубину до 80 мкм, которая не является концентратором напряжений при динамическом нагружении при комнатной температуре. Исследование влияния деформированного слоя с большей величиной деформации на значения ударной вязкости, а также влияния пониженных температур требует проведения дополнительного исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдурашитов А.А. Особенности работы рельсов в современных условиях эксплуатации // Путь и путевое хозяйство. 2020. № 8. С. 8–10.
2. Полевой Е.В., Юнин Г.Н., Головатенко А.В., Темлянец М.В. Новейшие разработки рельсовой продукции в АО «ЕВРАЗ ЗСМК» // Сталь. 2019. № 7. С. 55–58.
3. Шур Е. А. Повреждения рельсов. — М.: Транспорт, 1971. — 112 с.
4. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. — М.: Металлургия, 1983. — 352 с.
5. Исакаев Э.Х., Мордынский В.Б., Пенькова Г.И. и др. Зависимость прочностных характеристик рельсовой стали от концентраторов напряжений // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2011. № 12. С. 54–57.
6. Кормышев В.Е., Полевой Е.В., Юрьев А.А. и др. Формирование структуры дифференцированно закаленных 100-метровых рельсов при длительной эксплуатации // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 2. С. 108–115. Doi: 10.17073/0368-0797-2020-2-108-115.
7. Алферова Е.А., Филиппов А.В. Влияние структуры материала на морфологию деформированной поверхности // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2020. Т. 22. № 1. С. 90–101. Doi: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-90-101.
8. Тимошук Л.Т. Механические испытания металлов. — М.: Металлургия, 1971. — 224 с.
9. Матюнин В.М., Марченков А.Ю., Каримбеков М.А., Волков П.В. Анализ изломов образцов после испытаний на ударный изгиб и растяжение // Технология металлов. 2012. № 11. С. 54–56.
10. Максимов А.Б., Шевченко И.П., Ерохина И.С. Определение составляющих ударной вязкости металла при испытании на ударный изгиб // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 12. С. 68–72. Doi: 10.26896/1028-6861-2018-84-12-68-72.
11. Бакиши О.А., Моносииков А.Н., Кукин А.Г. Метод определения составляющих ударной вязкости // Заводская лаборатория. 1969. Т. 35. № 5. С. 615–619.
12. Дроздовский Б.А. О применении статического изгиба образцов с надрезом для количественной оценки кристалличности в изломе стали // Заводская лаборатория. 1946. Т. 12. № 4. С. 489–499.
13. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия.
14. ГОСТ 9454–78. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных комнатной и повышенных температурах.

Поступила 18 апреля 2022 г.

REFERENCES

1. Abdurashitov A.A. Features of rail performance in modern operating conditions. *Put' i putevye khozyaistvo*, 2020, no. 8, pp. 8–10. (In Russ.).
2. Polevoi E.V., Yunin G.N., Golovatenko A.V., Temlyantsev M.V. The latest developments in rail products at EVRAZ ZSMK. *Stal'*, 2019, no. 7, pp. 55–58. (In Russ.).
3. Shur E. A. *Povrezhdeniya rel'sov* [Damage to the rails]. Moscow: Transport, 1971, 112 p. (In Russ.).
4. Zolotarevskii V.S. *Mekhanicheskie svoystva metallov* [Mechanical properties of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 352 p. (In Russ.).
5. Isakaev E.Kh., Mordynskii V.B., Pen'kova G.I., Tyuftyaev A.S., Filippov G.A., Frolova M.G. Dependence of the strength characteristics of the rail steel on stress concentrators. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2011, no. 12, pp. 54–57. (In Russ.).
6. Kormyshev V.E., Polevoi E.V., Yur'ev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. Development of the structure of differentially hardened 100 m rails during their long operation. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 108–115. (In Russ.). Doi: 10.17073/0368-0797-2020-2-108-115.
7. Alferova E.A., Filippov A.V. Influence of material structure on deformed surface morphology. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 90–101. (In Russ.). Doi: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-90-101.
8. Timoshchuk L.T. *Mekhanicheskie ispytaniya metallov* [Mechanical testing of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 224 p. (In Russ.).

9. Matyunin V.M., Marchenkov A.Yu., Karimbekov M.A., Volkov P.V. Fracture analysis of specimens after impact bending and tensile tests. *Tekhnologiya metallov*, 2012, no. 11, pp. 54–56. (In Russ.).
10. Maksimov A.B., Shevchenko I.P., Erokhina I.S. Determination of metal impact toughness components in the impact bend test. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2018, vol. 84, no. 12, pp. 68–72. (In Russ.). Doi: 10.26896/1028-6861-2018-84-12-68-72.
11. Bakshi O.A., Monosikov A.N., Kukin A.G. Method for determining the components of impact toughness. *Zavodskaya laboratoriya*, 1969, vol. 35, no. 5, pp. 615–619. (In Russ.).
12. Drozdovskii B.A. On the application of static notched bending of specimens to quantify crystallinity in steel fracture. *Zavodskaya laboratoriya*, 1946, vol. 12, no. 4, pp. 489–499. (In Russ.).
13. GOST P 51685–2013. Railway rails. General specifications. (In Russ.).
14. GOST 9454–78. Metals. Method for testing the impact strength at low, room and high temperature. (In Russ.).

Received April 18, 2022