ВИАМ/2014-Тр-08-11

УДК 669.14

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ПОЯВЛЕНИЯ УЧАСТКОВ С РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ ИЗЛОМА В КОВАНЫХ ЗАГОТОВКАХ ИЗ СТАЛИ 38ХН3МФА

В.Б. Григоренко
кандидат технических наук

Л.В. Морозова

М.Р. Орлов
доктор технических наук

Август 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале *«Труды ВИАМ»*, №8, 2014 г.

УДК 669.14

В.Б. Григоренко[1], Л.В. Морозова[1], М.Р. Орлов[1]

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ПОЯВЛЕНИЯ УЧАСТКОВ С РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИЕЙ ИЗЛОМА В КОВАНЫХ ЗАГОТОВКАХ ИЗ СТАЛИ 38ХН3МФА

Исследованы изломы кованых заготовок из стали 38ХН3МФА с пониженным содержанием серы и фосфора. Установлены причины образования участков различной морфологии в изломах.

Ключевые слова: *сталь, излом, неметаллические включения.*

V.B. Grigorenko[1], L.V. Morozova[1], M.R. Orlov[1]

RESEARCH OF THE REASONS OF EMERGENCE OF SITES WITH DIFFERENT MORPHOLOGY OF A BREAK IN SHOD PREPARATIONS FROM STEEL 38HN3MFA

Destruction surface of shod preparations from steel 38ХН3МФА with the lowered sulfur content and phosphorus are investigated. The reasons of formation of sites of different morphology in breaks are established.

Keywords: *steel, break, non-metallic inclusions.*

[1]Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации
[Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Эксплуатационная надежность ответственных изделий – это удовлетворение требований, предъявляемых к качеству материала и конструктивно-технологическим решениям при проектировании и изготовлении металлических конструкций [1, 2]. Обеспечение этих требований зависит от уровня оснащенности современным технологическим оборудованием металлургического комплекса. Постоянно растущие требования к качеству металла являются стимулом для совершенствования существующих и развития новых металлургических процессов на всех переделах – начиная от выплавки стали с низким содержанием вредных примесей и заканчивая особо тщательным контролем полуфабрикатов и готовых изделий современными методами [3, 4].

Уменьшение содержания неметаллических включений с применением новых методов обработки позволяет повысить ранее взаимоисключающие свойства сталей, такие как вязкость, пластичность и прочность [5–7]. Однако стали повышенной чистоты из-за высокой подвижности границ зерен склонны к проявлению признаков остаточного перегрева [8, 9].

Исследованию поковок ответственного назначения из стали 38ХН3МФА на различных стадиях производства посвящены работы многих авторов [10–12]. Изучалось и замедленное разрушение изделий из данной стали [13]. В данной статье приведено комплексное исследование причин появления участков с различной морфологией разрушения в изломах стали 38ХН3МФА на основе фрактографического анализа [14, 15].

Сталь 38ХН3МФА с пониженным содержанием серы и фосфора была выплавлена в электропечи с последующей продувкой аргоном и вакуумированием. Предварительно обработанные заготовки подвергали ковке на парогидравлических прессах в два приема, при этом температура в печи перед началом ковки находилась на уровне 1180^{+20}_{-40} °С, температура начала ковки составляла 1160^{+20}_{-60} °С, окончания ковки – 900÷800°С. После ковки был проведен обезводороживающий отжиг. Затем заготовки были подвергнуты термической обработке (закалке с последующим высоким отпуском). В результате проведенных обработок при удовлетворительных показателях механических свойств в изломах контрольных образцов выявлены светлые участки (показаны стрелками на рис. 1).

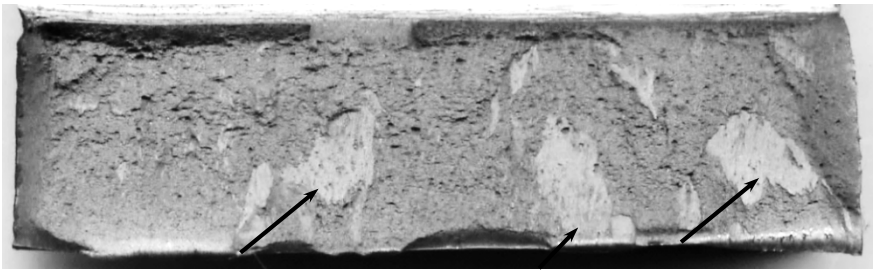


Рисунок 1. Макростроение излома образца, вырезанного из заготовки стали 38ХН3МФА (стрелками показаны светлые участки)

Методы исследований и оборудование

Исследование качества материала и установление причин разрушения заготовки из стали 38ХН3МФА выполнили в соответствии с областью аккредитации Испытательного центра ВИАМ [16–19].

Химический состав материала заготовок определяли оптико-эмиссионным и рентгено-флуоресцентным методом на спектрометре с искровым возбуждением

ARL-4460 и волнодисперсионном рентгено-флуоресцентном спектрометре S4 Explorer, а также на анализаторе содержания углерода и серы Leco CS-600.

Для оценки уровня механических свойств проводили испытания на маятниковом копре PH 300-CHV фирмы Walter+Bai AG на ударный изгиб образцов, вырезанных из центральной части поковки с надрезами в различных направлениях.

Изучение изломов заготовок из стали 38ХН3МФА проводили методом электронной фрактографии и металлографии высокого разрешения на растровом микроскопе JSM-6490LV фирмы Jeol.

Качественный и количественный анализ микроструктуры проводили с использованием оптического комплекса фирмы Leica в соответствии с ГОСТ 5639–82 и ГОСТ 1778–70. Подготовку металлографических образцов осуществляли на оборудовании фирмы Struers.

Результаты

Результаты исследований химического состава материала заготовки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав материала заготовки из стали 38ХН3МФА

Сталь 38ХН3МФА	Содержание элементов, % (по массе)									
	C	S	P	V	Cu	Mn	Si	Mo	Cr	Ni
Изготовленная заготовка	0,358	0,0041	0,0075	0,12	0,14	0,36	(0,28)	0,38	1,38	3,20
По ГОСТ 4543–71	0,33–0,4	≤0,025	≤0,025	0,1–0,18	≤0,3	0,25–0,5	0,17–0,37	0,35–0,45	1,2–1,5	3,0–3,5

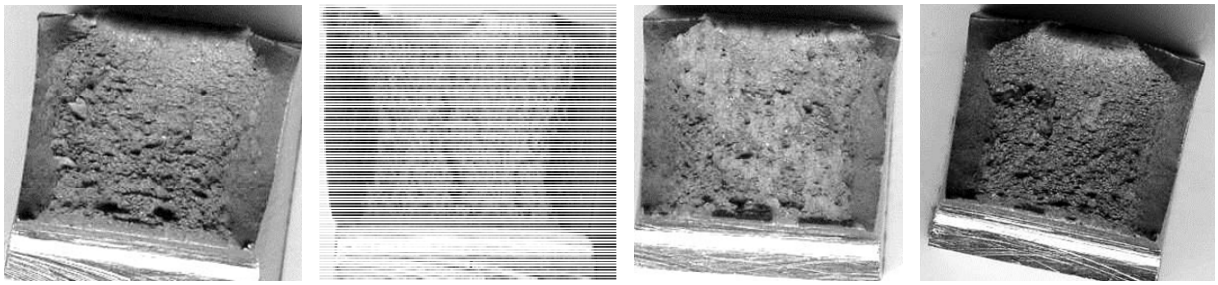
По результатам проведенного анализа установлено, что материал исследуемой заготовки соответствует заявленной марке стали 38ХН3МФА по ГОСТ 4543–71 и имеет пониженное содержание серы и фосфора.

Из заготовки изготовлены образцы, испытанные на ударную вязкость (табл. 2). По результатам проведенных испытаний значения ударной вязкости удовлетворяют требованиям ГОСТ 8479–70 (KCU≥490 кДж/м^2), при этом минимальное значение ударной вязкости (779 кДж/м^2) наблюдается в образце *3*, где большая часть излома занята светлой составляющей (рис. 2). В образцах *1*, *2*, *4* ударная вязкость выше, а в изломе наблюдаются лишь небольшие участки со светлой составляющей. Анализ нетравленых шлифов из стали 38ХН3МФА показал, что загрязненность неметаллическими включениями по всем видам включений не превышает 0,5–1 балла по ГОСТ Р ИСО 4967–2009.

Таблица 2

Результаты испытаний на ударную вязкость образцов из стали 38ХН3МФА

Направление надреза	Условный номер образца	*KC*U, кДж/м^2
По высоте заготовки	*1*	862
	2	886
В плоскости заготовки	*3*	779
	4	922



1 *2* *3* *4*

Рисунок 2. Вид изломов образцов (*1–4*), испытанных на ударную вязкость

Исследование структуры при помощи растрового электронного микроскопа показало, что наблюдается ориентированное расположение структурных составляющих, размер зерна в стали после окончательной термообработки находится в пределах 25–35 мкм, что соответствует баллу 7 по ГОСТ 5639–82 (рис. 3).

а) *б)*

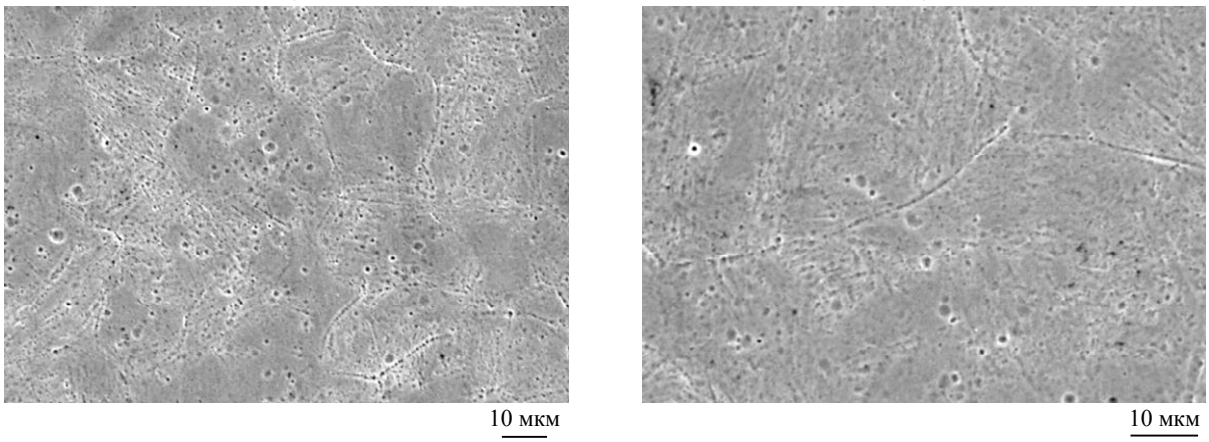


Рисунок 3. Микроструктура (*а* – ×1000; *б* – ×1500) образца из стали 38ХН3МФА (электролитическое травление)

Результаты фрактографических исследований заготовки и вырезанных из нее образцов после испытаний на ударную вязкость представлены на рис. 4–6. Особенностью разрушения является наличие светлой составляющей.

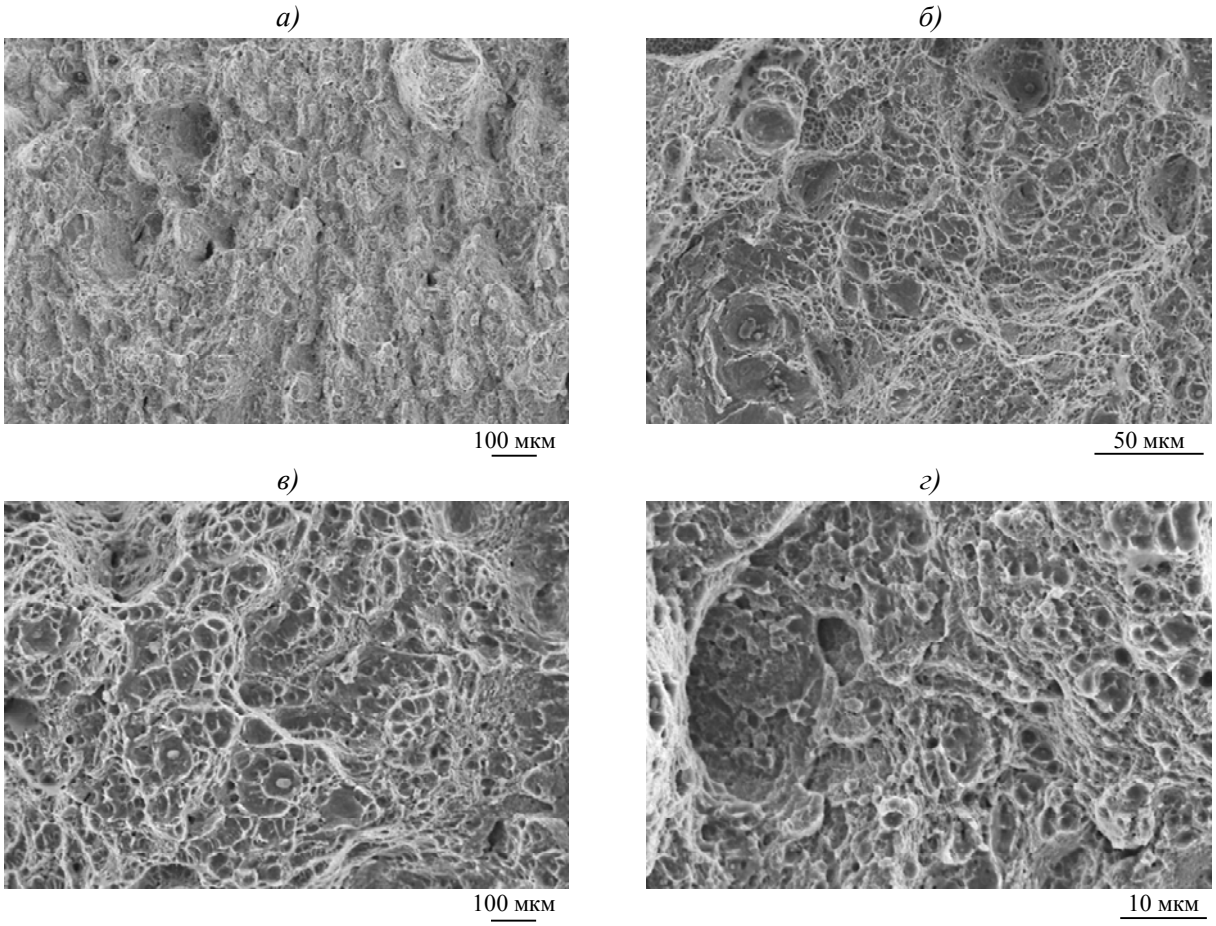


Рисунок 4. Характерное строение излома (*а* – ×100; *б* – ×500; *в* – ×1000; *г* – ×2000) заготовки из стали 38ХН3МФА

Изломы всех изученных образцов внутризеренные. Наблюдаются отдельные малопластичные, визуально плоские участки. Характерный рельеф разрушения показан на рис. 4. Установлено, что «светлые» площадки в изломе представляют собой участки с мелкоямочным малопластичным разрушением (см. рис. 5). На дне каждой ямки находятся дисперсные частицы размером ~1 мкм (см. рис. 5, *г*).

Проведенный микрорентгеноспектральный анализ показал, что данные частицы являются сульфидами марганца (см. рис. 6, *а–г*). Подобные скопления неметаллических включений в материале снижают его способность сопротивляться разрушению.

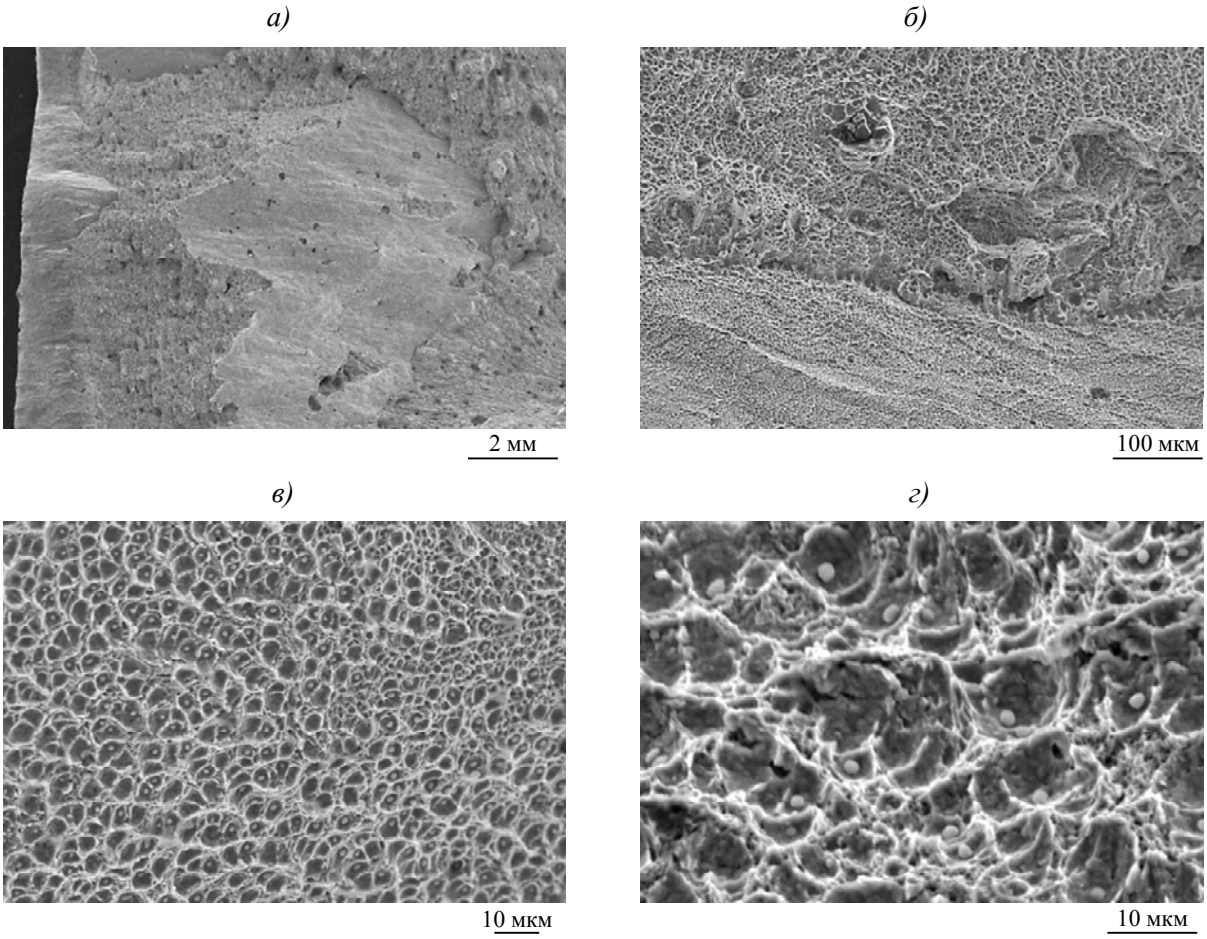


Рисунок 5. Строение (*а* – ×10; *б* – ×200; *в* – ×1000; *г* – ×2000) «светлых» участков в изломе заготовки из стали 38ХН3МФА

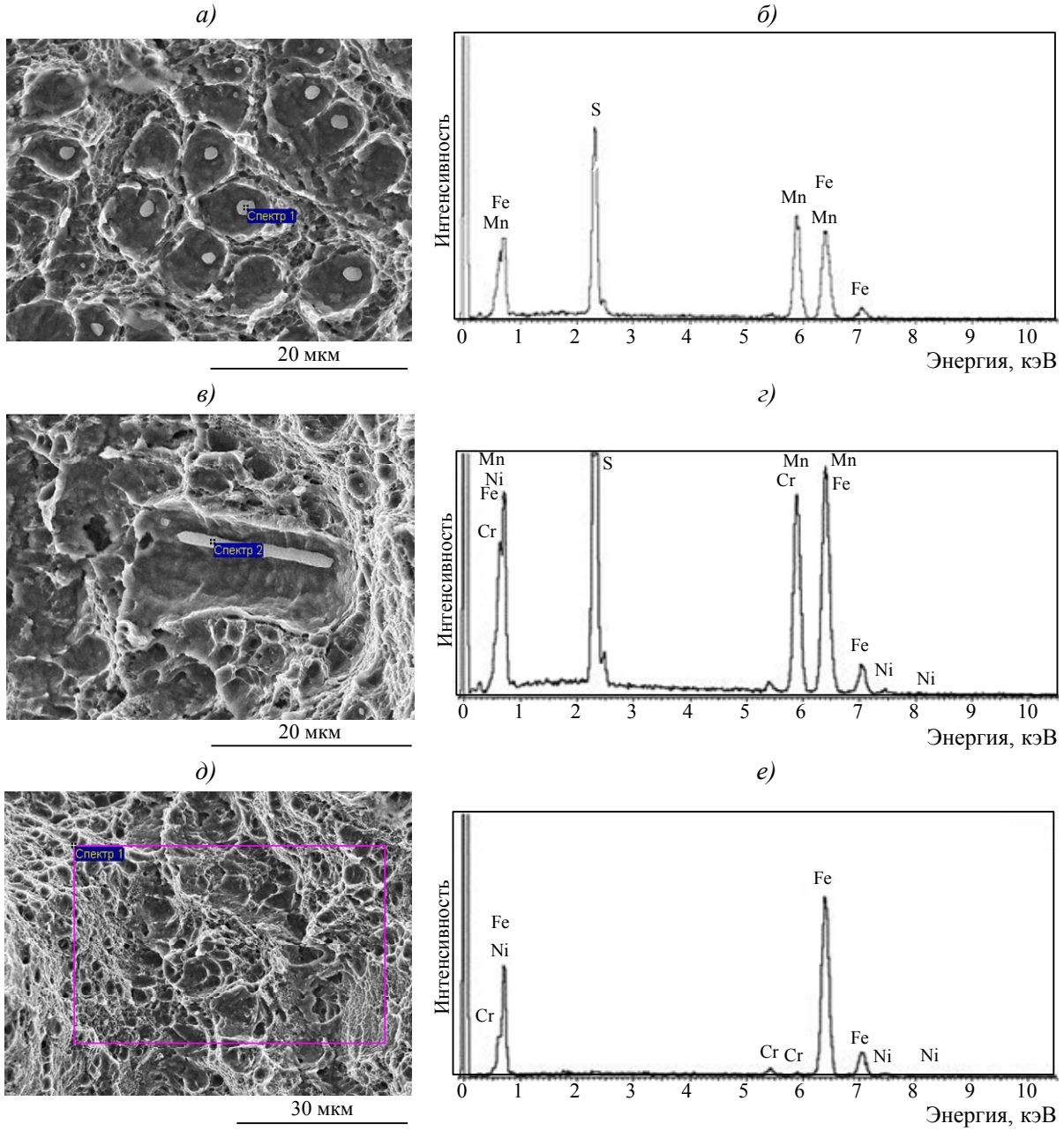


Рисунок 6. Результаты микрорентгеноспектрального анализа (*а*, *в* – ×3000; *д* – ×1700) участков излома заготовки из стали 38ХН3МФА:

а, *в*, *д* – место анализа; *б*, *г*, *е* – соответствующие спектрограммы

Обсуждение и заключения

Сталь 38ХН3МФА с пониженным содержанием примесей, полученная выплавкой в электропечи с продувкой аргоном и последующим вакуумированием, является сталью повышенной чистоты. Резкое снижение содержания вредных примесей (до 0,0041% S и 0,0075% P) способствует значительному повышению пластичности и ударной вязкости.

В процессе двукратного нагрева под ковку до температуры 1180°С без охлаждения, приводящего к фазовой перекристаллизации, сера из образовавшихся при кристаллиза-

ции сульфидов марганца переходит в твердый раствор (аустенит), при дальнейшем замедленном охлаждении на границах зерен выделяется значительное количество сульфидов марганца MnS, которые определяют путь распространения трещины с наименьшей энергоемкостью.

Возможно, степень укова является малой для устранения литейной неоднородности заготовок, так как сульфиды, сформировавшиеся по границам первичных дендритных зерен, не меняют своего расположения при окончательной термической обработке. Это вызвано использованием существенно более низкой температуры аустенизации (870±10°С – при нормализации и 860±10°С – при нагреве под закалку), недостаточной для растворения сульфидов марганца.

Одним из методов исправления структуры заготовок с низким уковом является применение дополнительной (повторной) операции осадки заготовки с последующей ковкой на требуемый размер.

Установлено, что материал заготовки соответствует заявленной марке стали 38ХН3МФА по ГОСТ 4543–71 и имеет пониженное содержание серы и фосфора; загрязненность по всем видам неметаллических включений не превышает 0,5–1 балла по ГОСТ Р ИСО 4967–2009; величина зерна соответствует баллу 7 по ГОСТ 5639–82; ударная вязкость образцов из исследуемой заготовки соответствует требованиям ГОСТ 8479–70.

Фрактографический анализ показал, что образование «светлых» участков в изломе связано с развитием процесса разрушения по скоплениям дисперсных сульфидов марганца, выделившихся по границам первичных аустенитных (дендритных) зерен, что характерно для недостаточной проработки структуры при ковке и является браковочным признаком согласно ГОСТ 10243–75.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России //Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженых деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 13–19.

4. Артес А.Э., Сосенушкин Е.Н. Проблемы производства крупных поковок в отечественном машиностроении //Технология машиностроения. 2012. №1. С. 11–15.
5. Одесский П.Д., Филиппов Г.А., Ливанова О.В., Егорова А.А. Прочность современных сталей для осей большого диаметра, применяемых в уникальных инженерных сооружениях //Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2012. №2. С. 31–38.
6. Шевцова О.А., Зюбан Н.А., Руцкий Д.В. Особенности формирования сульфидных включений и их влияния на качество низколегированных конструкционных сталей //Металлург. 2010. №12. С. 54–57.
7. Зюбан Н.А., Крючков О.Б. Влияние вакуумирования на особенности формирования сульфидных включений и свойства изделий из низколегированных конструкционных сталей //Известия вузов. Черная металлургия. 2008. №5. С. 15–18.
8. Смирнов М.А., Счастливцев В.М., Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали. М.: Наука и технологии. 2002. 519 с.
9. Борисов И.А., Дуб А.В. Влияние продолжительности высокого отпуска на текстуру и зерно перегретой роторной стали //МиТОМ. 2013. №3. С. 3–9.
10. Одесский П.Д., Егорова А.А., Тодорова Е.В. Анализ аварийного излома элемента стальной конструкции //Деформация и разрушение материалов. 2010. №7. С. 45–48.
11. Руцкий Д.В., Гаманюк С.Б., Зюбан Н.А., Посламовская Ю.А. Влияние химической и физической неоднородности слитка массой 24,2 т стали 38ХН3МФА на механические свойства трубных заготовок //Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. №1–2. С. 489–492.
12. Руцкий Д.В., Гаманюк С.Б., Зюбан Н.А., Чубуков М.Ю. Анализ внутренних дефектов слитка массой 103 т стали 38ХН3МФА и оценка их влияния на качество поковок роторов турбогенераторов //Технология металлов. 2010. №10. С. 15–18.
13. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Громов В.И. Замедленное разрушение стали 38ХН3МА в процессе длительной эксплуатации //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. №SP2. С. 5–12.
14. Клевцов Г.В., Ботвина Л.Р., Клевцова Н.А., Лимарь Л.В. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций. М.: МИСиС. 2007. 259 с.
15. Жегина И.П., Котельникова Л.В., Григоренко В.Б., Зимина З.Н. Особенности разрушения деформируемых никелевых сплавов и сталей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 455–465.

16. Орлов М.Р., Оспенникова О.Г., Громов В.И. Развитие механизмов водородной и бейнитной хрупкости конструкционной стали в процессе эксплуатации крупногабаритных конструкций //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 88–93.
17. Турченков В.А., Баранов Д.Е., Гагарин М.В., Шишкин М.Д. Методический подход к проведению экспертизы материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 47–53.
18. Ерасов В.С., Яковлев Н.О., Нужный Г.А. Квалификационные испытания и исследования прочности авиационных материалов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 440–448.
19. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 06. (viam-works.ru).

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Konstrukcionnye i funkcional'nye materialy – osnova jekonomicheskogo i nauchno-tehnicheskogo razvitija Rossii [Structural and functional materials - the basis of economic, scientific and technical development of Russia] //Voprosy materialovedenija. 2006. №1. S. 64–67.
2. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 7–17.
3. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokoteplonagruzhenyh detalej gazoturbinnyh dvigatelej [Materials for high-thermal components of gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 13–19.
4. Artes A.Je., Sosenushkin E.N. Problemy proizvodstva krupnyh pokovok v otechestvennom mashinostroenii [Problems of production of large forgings in domestic engineering] //Tehnologija mashinostroenija. 2012. №1. S. 11–15.
5. Odesskij P.D., Filippov G.A., Livanova O.V., Egorova A.A. Prochnost' sovremennyh stalej dlja osej bol'shogo diametra, primenjaemyh v unikal'nyh inzhenernyh sooruzhenijah [Strength steels for modern large diameter axles used in unique engineering structures] //Problemy chernoj metallurgii i materialovedenija. 2012. №2. S. 31–38.

6. Shevcova O.A., Zjuban N.A., Ruckij D.V. Osobennosti formirovanija sul'fidnyh vkljuchenij i ih vlijanija na kachestvo nizkolegirovannyh konstrukcionnyh stalej [Features of formation of sulphide inclusions and their impact on the quality of low-alloy structural steels] //Metallurg. 2010. №12. S. 54–57.
7. Zjuban N.A., Krjuchkov O.B. Vlijanie vakuumirovanija na osobennosti formirovanija sul'fidnyh vkljuchenij i svojstva izdelij iz nizkolegirovannyh konstrukcionnyh stalej [Effect of vacuum on the features of formation of sulfide inclusions and properties of the products of low-alloy structural steels] //Izvestija vuzov. Chernaja metallurgija. 2008. №5. S. 15–18.
8. Smirnov M.A., Schastlivcev V.M., Zhuravlev L.G. Osnovy termicheskoj obrabotki stali [Fundamentals of heat treatment of steel]. M.: Nauka i tehnologii. 2002. 519 s.
9. Borisov I.A., Dub A.V. Vlijanie prodolzhitel'nosti vysokogo otpuska na teksturu i zerno peregretoj rotornoj stali [Effect of high-temperature tempering the texture and grain of superheated steel rotor] //MiTOM. 2013. №3. S. 3–9.
10. Odesskij P.D., Egorova A.A., Todorova E.V. Analiz avarijnogo izloma jelementa stal'noj konstrukcii [Emergency break element analysis of the steel structure] //Deformacija i razrushenie materialov. 2010. №7. S. 45–48.
11. Ruckij D.V., Gamanjuk S.B., Zjuban N.A., Poslamovskaja Ju.A. Vlijanie himicheskoj i fizicheskoj neodnorodnosti slitka massoj 24,2 t stali 38HN3MFA na mehanicheskie svojstva trubnyh zagotovok [Effect of chemical and physical heterogeneity ingot weighing 24.2 tons of steel 38HN3MFA on mechanical properties of tubular billets] //Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN. 2010. T. 12. №1–2. S. 489–492.
12. Ruckij D.V., Gamanjuk S.B., Zjuban N.A., Chubukov M.Ju. Analiz vnutrennih defektov slitka massoj 103 t stali 38HN3MFA i ocenka ih vlijanija na kachestvo pokovok rotorov turbogeneratorov [Analysis of internal defects ingot weighing 103 tons of steel 38HN3MFA and assess their impact on the quality of forgings turbogenerator rotors] //Tehnologija metallov. 2010. №10. S. 15–18.
13. Orlov M.R., Ospennikova O.G., Gromov V.I. Zamedlennoe razrushenie stali 38HN3MA v processe dlitel'noj jekspluatacii [Delayed fracture steel 38HN3MA during long operation] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». 2011. №SP2. S. 5–12.
14. Klevcov G.V., Botvina L.R., Klevcova N.A., Limar' L.V. Fraktodiagnostika razrushenija metallicheskih materialov i konstrukcij [Fraktodiagnostika fracture of metallic materials and structures]. M.: MISiS. 2007. 259 s.

15. Zhegina I.P., Kotel'nikova L.V., Grigorenko V.B., Zimina Z.N. Osobennosti razrushenija deformiruemyh nikelevyh splavov i stalej [Features destruction wrought nickel alloys and steels] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 455–465.
16. Orlov M.R., Ospennikova O.G., Gromov V.I. Razvitie mehanizmov vodorodnoj i bejnitnoj hrupkosti konstrukcionnoj stali v processe jekspluatacii krupnogabaritnyh konstrukcij [Development of mechanisms for hydrogen brittleness and bainitic structural steel in the operation of large structures] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 88–93.
17. Turchenkov V.A., Baranov D.E., Gagarin M.V., Shishkin M.D. Metodicheskij podhod k provedeniju jekspertizy materialov [Methodical approach to the examination of materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 47–53.
18. Erasov V.S., Jakovlev N.O., Nuzhnyj G.A. Kvalifikacionnye ispytanija i issledovanija prochnosti aviacionnyh materialov [Qualification testing and research strength of aircraft materials] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 440–448.
19. Chabina E.B., Alekseev A.A., Filonova E.V., Lukina E.A. Primenenie metodov analiticheskoj mikroskopii i rentgenostrukturnogo analiza dlja issledovanija strukturno-fazovogo sostojanija materialov [Application of methods of analytical microscopy and X-ray analysis for the study of structural phase state materials] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 06. (viam-works.ru).