РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) RU (11) 2 757 923 (13) C1

(51) МПК
C22C 38/54 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
C22C 38/54 (2021.08)

(21)(22) Заявка: **2020143175, 25.12.2020**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
25.12.2020

Дата регистрации:
25.10.2021

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **25.12.2020**

(45) Опубликовано: **25.10.2021** Бюл. № **30**

Адрес для переписки:
308015, Белгородская обл., г. Белгород, ул. Победы, 85, НИУ "БелГУ", ОИС, Токтаревой Т.М.

(72) Автор(ы):
Кайбышев Рустам Оскарович (RU),
Федосеева Александра Эдуардовна (RU),
Дудова Надежда Рузилевна (RU),
Дудко Валерий Александрович (RU),
Мишнев Роман Владимирович (RU),
Ткачев Евгений Сергеевич (RU),
Никитин Иван Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный национальный исследовательский университет" (НИУ "БелГУ") (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2585591 C1, 27.05.2016. US 2013294959 A1, 07.11.2013. RU 2655496 C1, 28.05.2018. RU 2617272 C1, 24.04.2017. US 6546713 B1, 15.04.2003. EP 1466993 A1, 13.10.2004.**

(54) Жаропрочная сталь мартенситного класса

(57) Реферат:

Изобретение относится к области металлургии, а именно к жаропрочной хромистой стали мартенситного класса, применяемой для изготовления лопаток турбин энергетических установок с рабочей температурой пара до 650°С. Сталь содержит компоненты при следующем соотношении, мас.%: углерод 0,080–0,120, кремний не более 0,120, марганец 0,010-0,100, хром 9,000-10,500, никель не более 0,25, вольфрам 1,900-2,500, молибден 0,600-0,700, ванадий 0,170-0,250, ниобий 0,040-0,070, азот не более 0,003, бор 0,008-0,015, кобальт 2,500-3,500, рений 0,100-0,200, медь 0,750-1,000, сера не более 0,006, фосфор не более 0,010, алюминий не более 0,030, титан не более 0,010, железо остальное. Количество вольфрама и молибдена определяют из условия, что значение молибденового эквивалента, выраженного формулой Mo_{eq}=Mo+0,5W, лежит в пределах 1,55-1,95. Обеспечивается повышение показателей длительной прочности. 2 ил., 3 табл.

RU 2757923 C1

RU 2757923 C1

RUSSIAN FEDERATION

FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(19) **RU** (11) **2 757 923**(13) **C1**

(51) Int. Cl.
C22C 38/54 (2006.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC
C22C 38/54 (2021.08)

(21)(22) Application: **2020143175, 25.12.2020**

(24) Effective date for property rights:
25.12.2020

Registration date:
25.10.2021

Priority:
(22) Date of filing: **25.12.2020**

(45) Date of publication: **25.10.2021** Bull. № **30**

Mail address:
308015, Belgorodskaya obl., g. Belgorod, ul. Pobedy, 85, NIU "BelGU", OIS, Toktarevoj T.M.

(72) Inventor(s):
Kajbyshev Rustam Oskarovich (RU),
Fedoseeva Aleksandra Eduardovna (RU),
Dudova Nadezhda Ruzilevna (RU),
Dudko Valerij Aleksandrovich (RU),
Mishnev Roman Vladimirovich (RU),
Tkachev Evgenij Sergeevich (RU),
Nikitin Ivan Sergeevich (RU)

(73) Proprietor(s):
federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Belgorodskij gosudarstvennyj natsionalnyj issledovatelskij universitet" (NIU "BelGU") (RU)

(54) HEAT-RESISTANT STEEL OF THE MARTENSITIC CLASS

(57) Abstract:

FIELD: metallurgy.

SUBSTANCE: invention relates to the field of metallurgy, namely to heat-resistant chromium steel of the martensitic class used for the manufacture of turbine blades of power plants with an operating steam temperature of up to 650°C. Steel contains components at the following ratio, wt. %: carbon 0.080–0.120, silicon no more than 0.120, manganese 0.010-0.100, chromium 9.000-10.500, nickel no more than 0.25, tungsten 1.900-2.500, molybdenum 0.600-0.700, vanadium 0.170-0.250, niobium 0.040-0.070, nitrogen no more than 0.003, boron 0.008-0.015, cobalt 2.500-3.500, rhenium 0.100-0.200, copper 0.750-1.000, sulfur not more than 0.006, phosphorus not more than 0.010, aluminum not more than 0.030, titanium not more than 0.010, iron the rest. The amount of tungsten and molybdenum is determined from the condition that the value of the molybdenum equivalent, expressed by the formula Mo_{eq}=Mo+0.5 W, lies in the range of 1.55-1.95.

EFFECT: increase in the indicators of long-term strength is provided.

1 cl, 2 dwg, 3 tbl

RU 2757923 C1

RU 2757923 C1

Изобретение относится к области металлургии, в частности, к жаропрочным хромистым сталям мартенситного класса, содержащим 10% Cr, применяемым в тепловой энергетической промышленности для изготовления оборудования тепловых и газовых турбин. Предлагаемая сталь может применяться для изготовления лопаток паровых турбин энергетических установок с рабочими температурами до 630-650°С.

Согласно ГОСТ 18968-73 и ГОСТ 5632-72 в конструкциях тепловых и газовых турбин применяются коррозионностойкие и жаропрочные стали, а также металлические сплавы на никелевой основе. В зависимости от температуры эксплуатации для изготовления лопаток паровых турбин применяются стали 20Х13 (до 440°С), 15Х11МФ (до 540°С) и 15Х12ВНМФ (до 580°С). К недостаткам указанных сталей относятся низкое сопротивление ползучести при температурах выше 580°С, а также ограниченная свариваемость, что делает невозможным их применение для изготовления лопаток турбин для работы при температурах выше 580°С.

На данный момент за рубежом наиболее используемой из коммерческих сталей для лопаток паровых турбин является сталь Р122 со следующим химическим составом: содержание углерода в пределах 0,10-0,18 мас.%, азота в пределах 0,02-0,05%, бора менее 0,01%, хрома в пределах 11,0-12,0%, (Mn+Ni) в пределах 0,3-1,4%, (Mo+W) в пределах 0,65-3%, (V+Nb) в пределах 0,22-0,30%, которая допускает длительную эксплуатацию при температурах до 600°С и короткоресурсную работу до 620°С. Основным препятствием для использования данной стали при более высокой температуре является резкое сопротивляемости ползучести на больших ресурсах. В настоящее время установлено, что высокое сопротивление ползучести этих сталей обусловлено дислокационной структурой отпущенного мартенсита и карбонитридами M(C,N). Температура эксплуатации данных сталей была увеличена на 100°С, благодаря использованию оптимального соотношения между (0,07%Nb +0,24%V) и (0,1%C+0,05%N) для формирования высокодисперсных частиц карбонитридов M(C,N). Основные механизмы разупрочнения, приводящие к снижению сопротивления ползучести в этих сталях, к данному моменту достаточно тщательно изучены. К ним относятся: выделение и рост частиц фазы Лавеса (Fe_2W), сопровождающиеся уходом подавляющих диффузию элементов (W и Mo) из твердого раствора; укрупнение зернограничных частиц, обеспечивающих стабилизацию троостомартенситной структуры; образование частиц Z-фазы, приводящее к уменьшению объемной доли мелкодисперсных карбонитридов M(C,N).

Типичные химические составы сталей для лопаток паровых турбин, раскрытые в источниках Tadashi Tanuma, Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants, P555; Viswanathan R., Bakker W., Materials for Ultrasupercritical coal power plants-Turbine Materials: Part II, JMEPEG, P.96-101 представлены в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав мартенситных сталей для производства роторов и лопаток (мас.%) и максимальные температуры их эксплуатации

№	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Nb+Ta	N	W	Co	B	Fe	$T_{экспл}$, °C
1	0,18	0,20	0,7	0,4	11,0	1,0	0,20	0,07	0,05	-	-	-	осн.	566
2	0,14	0,05	0,6	0,7	10,0	1,0	0,20	0,05	0,05	1,0	-	-	осн.	593
3	0,11	0,08	0,1	0,2	10,0	0,65	0,20	0,05	0,02	1,8	3,0	0,01	осн.	600
4	0,18	0,40	0,6	0,4	11,0	1,0	0,20	0,5	0,06	-	-	-	осн.	566
5	0,16	0,05	0,5	0,7	11,0	1,0	0,20	0,2	0,05	1,1	-	-	осн.	593

Из мартенситных сталей № 1-3 изготовляют роторы паровых турбин, № 4-5 – лопатки паровых турбин. Добавление вольфрама в стали №2 и 5 приводит к повышению температуры эксплуатации до 593°С за счет повышения твердорастворного упрочнения, добавление кобальта и бора в сталь №3 повышает максимальную температуру эксплуатации до 600°С за счет снижения содержания дельта-феррита, который является фазой, неблагоприятно влияющей на сопротивление ползучести, и повышения термической стабильности зернограничных карбидов, позитивно влияющих на сопротивление ползучести. Однако, как видно из таблицы 1, все представленные химические составы содержат 10-11%Cr и высокое содержание азота, что неизбежно провоцирует образование частиц Z-фазы, негативно сказывающейся на сопротивлении ползучести (H.K. Danielsen, Review of Z phase precipitation in 9–12 wt-%Cr steels, Mat. Sci. Techn., 32 (2016) 126-137).

Таким образом, одной из основных проблем при создании тепловых электростанций с суперсверхкритическими параметрами пара: температурой 620-650°С и давлением 30-35 МПа, является необходимость разработки более жаропрочных и относительно экономичных конструкционных материалов и, в том числе, для лопаток паровых турбин.

Наиболее близкой к предлагаемой стали является сталь, раскрытая в патенте RU2585591 (опубликован 27.05.2016). Сталь содержит, мас.%:

Углерод	0,080–0,120
Кремний	не более 0,100
Марганец	0,050-0,100
Хром	9,500-10,000
Никель	не более 0,200
Вольфрам	2,300-3,000
Молибден	0,05-0,100
Ванадий	0,180-0,250
Ниобий	0,040-0,070
Азот	не более 0,003
Бор	0,008-0,013
Кобальт	2,500-3,500
Рений	0,100-0,200
Сера	не более 0,006
Фосфор	не более 0,010
Алюминий	не более 0,010
Медь	0,050-0,300
Титан	не более 0,010
Железо	остальное

Содержание молибдена и вольфрама определяется как %W/2+%Mo<1,55. Данная сталь обладает высоким уровнем сопротивления ползучести до температуры 630°С. Это позволяет использовать ее для изготовления лопаток турбин энергетических установок, работающих при 600-620°С.

Высокое сопротивление ползучести стали по прототипу достигается благодаря формированию структуры троостита отпуска при термической обработке, заключающейся в нормализации с 1050°С с последующим отпуском при 770°С в течение 3 час, с последующим охлаждением на воздухе. Внутри реечной структуры формируется высокая плотность дислокаций, что вызывает большие внутренние напряжения, благодаря которым сталь способна сопротивляться ползучести в течение длительного времени. Особенностью стали по прототипу является наличие рения, повышенное содержание вольфрама и пониженное содержание молибдена. Такое легирование, как предполагалось, должно было либо полностью подавить выделение частиц фазы Лавеса, либо сдвинуть начало выделения этих частиц в сторону более длительного времени эксплуатации, тем самым сохранив весь введенный вольфрам в твердом растворе. Основным недостатком данной стали является то, что при ползучести фаза Лавеса, Fe2 (W,Mo) все-таки выделяется, что приводит к значительному обеднению твердого раствора вольфрамом и уменьшает твердорастворное упрочнение.

Дополнительные исследования стали по прототипу показали, что она демонстрирует уникально высокое сопротивление ползучести в условиях 650°С/140 МПа, при этом время до разрушения составляет 10987 часов. Видимо, такие показатели обусловлены наличием рения. Однако, быстрый рост отдельных частиц фазы Лавеса до размеров, сопоставимых с размером небольших субзерен 1-2 мкм, ведет к появлению трещин и несплошностей внутри материала при испытаниях на ползучесть при более низких напряжениях. (A Fedoseeva, I Nikitin, N Dudova, R. Kaibyshev, Superior creep resistance of a high-Cr steel with Re additives, Materials Letters 262 (2020) 127183).

Таким образом, недостаток прототипа - слишком короткое рабочее время при температуре 650°С.

Задачей предлагаемого изобретения является устранение недостатка прототипа.

Технический результат - предложенная сталь обладает повышенными характеристиками длительной прочности за счет повышенного сопротивления ползучести и в результате работоспособна при температуре 650°С в несколько раз дольше, чем прототип.

Поставленная задача решается предлагаемой жаропрочной сталью мартенситного класса, содержащей рений, в которой повышено содержание меди до 0,750-1,000%, при соблюдении соотношения между медью и рением в пределах 3,75 - 10,0, снижено количество вольфрама на 30%, а количество молибдена определяют из условия, что значение молибденового эквивалента, выраженного формулой Moeq=Mo+0,5W лежит в пределах 1,55 - 1,95, при этом соотношение между молибденовым эквивалентом и рением Moeq=Mo+0,5W лежит в пределах 7,75 - 19,5, а также соотношение между молибденовым эквивалентом и медью лежит в пределах 1,55 - 2,60, при следующем соотношении компонентов, мас.%:

Углерод	0,080–0,120
Кремний	не более 0,120
Марганец	0,010-0,100
Хром	9,000-10,500
Никель	не более 0,25
Вольфрам	1,900-2,500
Молибден	0,600-0,700
Ванадий	0,170-0,250
Ниобий	0,040-0,070
Азот	не более 0,003
Бор	0,008-0,015
Кобальт	2,500-3,500

Рений	0,100-0,200
Медь	0,750-1,000
Сера	не более 0,006
Фосфор	не более 0,010
Алюминий	не более 0,030
Титан	не более 0,010
Железо	остальное

Состав предложенной 10% Cr стали содержит следующие известные признаки:

Содержание углерода в количестве 0,08-0,12% повышает прокаливаемость стали, а также обеспечивает формирование зернограничных карбидов типа M23C6. Содержание углерода менее 0,08% не обеспечивает необходимого уровня кратковременных механических свойств и длительной прочности. Повышение углерода свыше 0,12% нецелесообразно, т.к. ухудшает свариваемость стали.

Молибден и вольфрам упрочняют твердый раствор, а также входят в состав карбидов типа M23C6 и затрудняют их коагуляцию, что повышает жаропрочные свойства стали.

Содержание ванадия в количестве 0,17-0,25% и ниобия в количестве 0,04-0,07% обеспечивает дисперсионное упрочнение за счет формирования мелкодисперсных карбонитридов M(C,N), что повышает длительную прочность.

Кобальт в количестве 2,5-3,5% повышает твердорастворное упрочнение. Как аустенитообразующий элемент, кобальт сдерживает образование дельта-феррита. При содержании кобальта менее 2,5% происходит образование дельта-феррита. При избыточном содержании кобальта более 3,5% происходит уменьшение пластичности стали.

Рений в количестве 0,1-0,2% снижает скорость диффузионно-контролируемых процессов в стали, и, соответственно, обеспечивает снижение интенсивности разупрочнения стали под воздействием температур и напряжений. При добавлении рения в количестве менее 0,1% эффект от этого элемента незначителен. При добавлении рения в количестве более 0,2% сталь переупрочняется, и значительно снижаются характеристики пластичности и ударной вязкости

Титан в количестве не более 0,01% способствует формированию и стабилизации мелких карбонитридов MX, обогащенных ванадием и ниобием. При содержании титана свыше 0,01% происходит образование крупных карбонитридов, что снижает сопротивление ползучести.

Ограничение содержания фосфора до 0,01% и серы до 0,006% способствует получению более высоких характеристик пластичности стали.

Введение бора в количестве 0,008-0,015% повышает сопротивление деформации при ползучести. Бор сегрегирует по границам зерен, преимущественно бывшим аустенитным, что подавляет зернограничное проскальзывание и тем самым повышает время до разрушения. Бор в предлагаемой стали входит в состав карбидов типа M23C6 и уменьшает скорость их коагуляции при повышенных температурах, что повышает сопротивление деформации при ползучести. Кроме того, бор повышает сопротивление коррозии под напряжением и нивелирует неблагоприятное влияние повышенного содержания ванадия на окалиностойкость.

В качестве раскислителей в состав стали введены марганец в количестве 0,01-0,100%, кремний в количестве не более 0,12%, никель в количестве не более 0,25% и алюминий в количестве не более 0,03%. При содержании марганца более 0,1% и кремния более 0,12% усиливается склонность к образованию дельта-феррита, который неблагоприятно сказывается на ударной вязкости. Никель улучшает прокаливаемость стали и вязкость, сдерживает образование дельта-феррита. Повышение содержания никеля свыше 0,25%

нецелесообразно, так как уменьшает длительную прочность из-за ускорения укрупнения частиц. При содержании алюминия свыше 0,03% образуются нитриды, которые снижают длительную прочность.

Предложенная сталь включает следующие новые, неизвестные из уровня техники признаки:

- увеличено количество меди до 0,750-1,000%, при соблюдении соотношения между рением и медью в пределах 3,75 - 10,0, что способствует образованию мелкодисперсной фазы Лавеса на медных кластерах и замедляет скорость ее роста в процессе ползучести, а также предотвращает образование дельта-феррита при высокотемпературной деформации, что повышает сопротивление ползучести стали;

- снижено количество вольфрама на 30%, а количество молибдена определяют из условия, что значение молибденового эквивалента, выраженного формулой Mo_{eq}=Mo+0,5W (источник: R. L. Klueh «Elevated temperature ferritic and martensiticsteels and their application to future nuclearreactors» International Materials Reviews2005 стр. 295) лежит в пределах 1,55 - 1,95. Это обеспечивает достаточное количество вольфрама и молибдена и в твердом растворе и в частицах фазы Лавеса в течение длительных испытаний на ползучесть;

- соотношение между молибденовым эквивалентом и рением лежит в пределах 7,75 - 19,5, а также соотношение между молибденовым эквивалентом и медью должно быть в пределах 1,55 - 2,60, что увеличивает жаропрочность стали, а также повышает сопротивление ползучести стали.

Изобретательский уровень состоит в том, что выявлено, неизвестное ранее, влияние соотношения легирующих элементов для 10%Cr стали, содержащей рений и с пониженным содержанием азота, в которой увеличено количество меди и снижено количество вольфрама, на повышение сопротивления ползучести при 650°C , что в результате в несколько раз увеличивает работоспособность стали при температуре 650°C, по сравнению с прототипом.

Фигуры, подтверждающие осуществимость изобретения.

Фиг.1 Зависимость времени до разрушения от приложенного напряжения при температуре 620°C.

Фиг.1 Зависимость времени до разрушения от приложенного напряжения при температуре 650°C.

Примеры осуществления.

Были отлиты сплавы предлагаемых химических составов (табл. 2). Выплавка сплавов производилась в вакуумно-индукционной печи. В качестве шихты были использованы чистые шихтовые материалы, что позволило получить низкий уровень серы, фосфора и цветных металлов в полученных материалах. Слитки были гомогенизированы при температуре 1150°C в течение 16 часов с последующим охлаждением на воздухе. Слитки после обдирки были перекованы на заготовки прямоугольного сечения 65×140 мм^2 методом свободной ковки в интервале температур от 1200°C до 1000°C. Затем слитки были подвергнуты нормализации при температуре 1050°C в течение 3 часов с последующим охлаждением на воздухе и отпуску при 770°C в течение 3 часов с последующим охлаждением на воздухе.

Таблица 2. Химический состав предложенной стали по примерам 1-5 и стали-прототипа

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Mo	W	V	Nb	N	B	Re	Al	S	P	Cu
Пример 1	0,09	0,11	0,03	9,6	0,23	2,6	0,65	1,95	0,17	0,05	0,002	0,015	0,20	0,03	0,005	0,01	0,79
Пример 2	0,11	0,10	0,02	9,5	0,15	3,0	0,60	2,50	0,18	0,05	0,003	0,008	0,15	0,03	0,006	0,01	0,75
Пример 3	0,10	0,11	0,03	9,7	0,20	2,7	0,70	1,98	0,18	0,06	0,002	0,010	0,18	0,03	0,005	0,01	1,00
Пример 4	0,12	0,10	0,03	9,8	0,15	3,2	0,50	1,80	0,18	0,07	0,003	0,012	0,15	0,03	0,005	0,01	0,50
Пример 5	0,10	0,10	0,02	9,4	0,18	2,9	0,70	3,20	0,20	0,05	0,003	0,008	0,10	0,03	0,005	0,01	1,20
Сталь-прототип	0,11	0,06	0,1	10,0	0,20	3,0	0,1	3,00	0,2	0,04	0,003	0,008	0,18	0,01	0,006	0,008	0,30

Необходимо отметить, что в примерах 1-3 осуществления изобретения количество легирующих элементов входит в указанные пределы заявленной стали. Однако в последних двух примерах были допущены отклонения от заданного химического состава, а именно:

- в примере 4 количество меди меньше нижнего предела содержания меди, молибденовый эквивалент также меньше нижней границы заявленного диапазона, что нарушает соотношения между медью и рением, а также между молибденовым эквивалентом и медью.

- в примере 5 количество меди выше верхнего предела, молибденовый эквивалент также выше верхней границы заявленного диапазона, что нарушает соотношения между медью и рением, а также между молибденовым эквивалентом и рением.

Испытания на длительную прочность проводились по ГОСТ 10145-62 до 2 000 часов. Предел длительной прочности на базе 10^5 часов был рассчитан с помощью параметра Ларсона-Миллера по формуле

$P=T(\lg\tau+36)*E-3$

где T – температура испытания в К, τ – время до разрушения в час.

Результаты испытаний приведены в табл.3

Таблица 3. Испытания на ползучесть

Длительная прочность при ползучести, σ за 10^5 час, МПа	Пример 1	Пример 2	Пример 3	Пример 4	Пример 5	Сталь-прототип
$T_{испытания}$ =620°C	150	150	150	110	107	140
$T_{испытания}$ =650°C	110	115	108	85	80	105

Как видно из таблицы 3, механические свойства предлагаемой стали по примерам 1-3, легированной в заявленных допустимых пределах содержания элементов и при условии выполнения заявленных соотношений, выше по сравнению со сталью-прототипом и по сравнению с образцами по примеру 4 и примеру 5.

Длительная прочность на базе 100 000 ч стали по примерам 1-3 при температуре 620°C составляет в среднем 150±5 МПа (фиг.1), а при температуре 650°C - в среднем 111±5 МПа (фиг.2), что доказывает повышение длительной прочности стали.

Легирование стали не в заявленных пределах приводит к снижению длительной прочности, что связано с низким содержанием меди в примере 4, который при таком количестве не оказывает положительного эффекта, а также с нарушением молибденового эквивалента – он равен 1,40, что снижает твердорастворное упрочнение. В примере 5 количество меди завышено, а также завышено значение молибденового эквивалента (равно 2,3), что приводит к переупрочнению стали, с одной стороны, а с другой, к избыточному выделению фазы Лавеса в процессе ползучести, вследствие чего величины пластичности и ударной вязкости снижаются, что приводит к падению длительной

прочности.

Как видно из таблицы 3 и фиг.1 и 2, при легировании стали в заявленных пределах и при соблюдении заявленных соотношений, показатели длительной прочности предлагаемой стали выше, чем у прототипа, что позволяет применять ее для изготовления лопаток паровых турбин и других элементов энергетических установок.

Использование стали в теплоэнергетике позволит поднять рабочую температуру тепловых электростанций до 650°С.

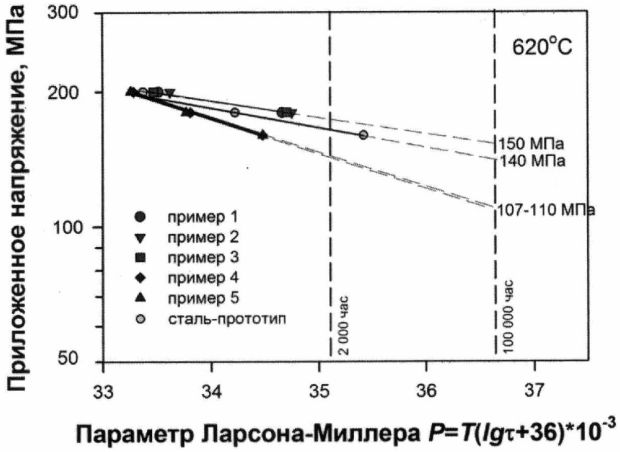
(57) Формула изобретения

Жаропрочная сталь мартенситного класса, содержащая углерод, кремний, марганец, хром, никель, вольфрам, молибден, рений, ванадий, ниобий, азот, бор, кобальт, серу, фосфор, алюминий, медь, рений, титан и железо, отличающаяся тем, что она содержит компоненты при следующем соотношении, мас.%:

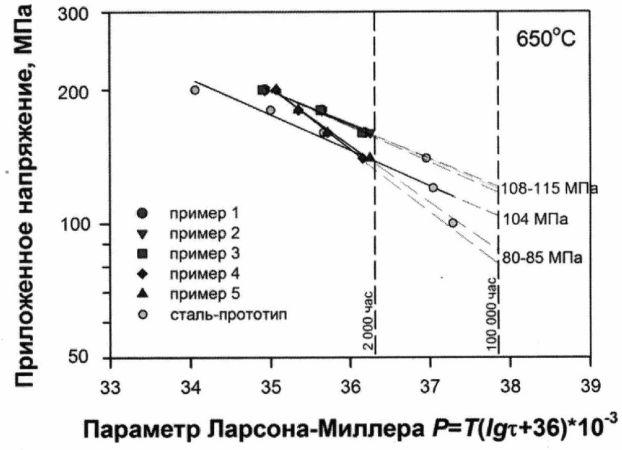
Углерод	0,080–0,120
Кремний	не более 0,120
Марганец	0,010-0,100
Хром	9,000-10,500
Никель	не более 0,25
Вольфрам	1,900-2,500
Молибден	0,600-0,700
Ванадий	0,170-0,250
Ниобий	0,040-0,070
Азот	не более 0,003
Бор	0,008-0,015
Кобальт	2,500-3,500
Рений	0,100-0,200
Медь	0,750-1,000
Сера	не более 0,006
Фосфор	не более 0,010
Алюминий	не более 0,030
Титан	не более 0,010
Железо	остальное,

при этом количество вольфрама и молибдена определяют из условия, что значение молибденового эквивалента, выраженного формулой Mo_{eq}=Mo+0,5W, лежит в пределах 1,55-1,95.

1


Приложенное напряжение, МПа
300
200
100
50
620°C
150 МПа
140 МПа
107-110 МПа
пример 1
пример 2
пример 3
пример 4
пример 5
сталь-прототип
2 000 час
100 000 час
33
34
35
36
37
Параметр Ларсона-Миллера P=T(lgτ+36)*10-3

Фиг.1


Приложенное напряжение, МПа
300
200
100
50
650°C
108-115 МПа
104 МПа
80-85 МПа
пример 1
пример 2
пример 3
пример 4
пример 5
сталь-прототип
2 000 час
100 000 час
33
34
35
36
37
38
39
Параметр Ларсона-Миллера P=T(lgτ+36)*10-3

Фиг.2