



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2016103968, 08.02.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
08.02.2016Дата регистрации:
10.04.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 08.02.2016

(45) Опубликовано: 10.04.2017 Бюл. № 10

Адрес для переписки:

308015, Белгородская обл., г. Белгород, ул.
Победы, 85, НИУ "БелГУ", ОИС, Цуриковой
Н.Д.

(72) Автор(ы):

**Кайбышев Рустам Оскарович (RU),
Беляков Андрей Николаевич (RU),
Кусакин Павел 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 2563066 C2, 20.09.2015. RU
2329308 C2, 20.07.2008. RU 2573843 C2,
27.01.2016. RU 2359765 C2, 27.06.2009. RU
2430184 C2, 27.09.2011. US 7806165 B2,
05,10,2010. WO 2014149732 A1, 25.09.2014.(54) **Высокопрочная сталь системы Fe-Mn-Al-C, обладающая эффектом TWIP и TRIP**

(57) Реферат:

Изобретение относится к области металлургии, а именно к получению конструкционной высокопрочной аустенитной высокомарганцевой стали, обладающей эффектами пластичности, наведенной двойникованием (TWIP) и наведенной превращением (TRIP), используемой в строительстве для изготовления демпфирующих

элементов сейсмостойких сооружений. Сталь содержит, вес.%: марганец 9–30, углерод 0,01–0,8, алюминий 0,01–1,0, кремний 0–6, азот 0,015–0,4, водород не более 0,0004, сера не более 0,01, фосфор не более 0,01, железо и неизбежные примеси остальное. Сталь обладает высокими значениями механических свойств при циклических нагрузках. 1 з.п. ф-лы, 2 ил., 2 пр.



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
C22C 38/04 (2006.01)
C22C 38/06 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2016103968, 08.02.2016**

(24) Effective date for property rights:
08.02.2016

Registration date:
10.04.2017

Priority:

(22) Date of filing: **08.02.2016**

(45) Date of publication: **10.04.2017** Bull. № 10

Mail address:

**308015, Belgorodskaya obl., g. Belgorod, ul. Pobedy,
85, NIU "BelGU", OIS, Tsurikovoj N.D.**

(72) Inventor(s):

**Kajbyshev Rustam Oskarovich (RU),
Belyakov Andrej Nikolaevich (RU),
Kusakin Pavel Sergeevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Belgorodskij gosudarstvennyj
natsionalnyj issledovatel'skij universitet" (NIU
"BelGU") (RU)**

(54) **HIGH-STRENGTH STEELS OF Fe-Mn-Al-C SYSTEM WITH TWIP AND TRIP EFFECTS**

(57) Abstract:

FIELD: metallurgy.

SUBSTANCE: invention relates to the production of high-strength austenitic manganese structural steel having the effects of twinning-induced plasticity (TWIP) and transformation induced plasticity (TRIP) and used in construction for the manufacture of damping elements for earthquake-resistant structures. The steel comprises by weight %: 9-30 manganese, 0.01-0.8

carbon, 0.01-1.0 aluminum, 0-6 silicon, 0.015-0.4 nitrogen, not more than 0.0004 hydrogen, not more than 0.01 sulfur, less than 0.01 phosphorus, iron and unavoidable impurities are the rest.

EFFECT: steel has high mechanical properties under cyclic loading.

2 cl, 2 dwg, 2 ex

RU 2 615 738 C1

RU 2 615 738 C1

Изобретение относится к области металлургии, а именно к получению конструкционной высокопрочной аустенитной высокомарганцевой стали, обладающей эффектом пластичности, наведенной двойникованием, которая может быть использована в строительстве, в том числе - для изготовления демпфирующих элементов, используемых в сейсмостойких сооружениях.

Основные требования к таким материалам - высокий уровень механических свойств при циклических нагрузках, которым подвержены демпфирующие элементы сейсмостойких сооружений. Такой высокий уровень механических свойств обеспечивается присутствием в микроструктуре наноразмерных двойников деформации (20-50 нм) в результате эффекта пластичности, наведенной двойникованием. Для наличия эффекта пластичности, наведенной двойникованием, требуется значение энергии дефектов упаковки (ЭДУ) в интервале от 20 до 40 мДж/м² [Saeed-Akbari A., Mosecker L., Schwedt A. & Bleck W. Characterization and Prediction of Flow Behavior in High-Manganese Twinning Induced Plasticity Steels: Part I. Mechanism Maps and Work-Hardening Behavior. Metall. Mater. Trans. A 43, 1688-1704 (2011)]. Такие значения достигаются при наличии в составе:

- марганца (Mn)
- углерода (C)
- алюминия (Al)
- кремния (Si)
- азота (N)

Известна деформируемая сталь для облегченных конструкций (RU 2430184, опубл. 27.01.2010) со свойствами TRIP и TWIP, содержащая элементы, вес. %: C=0,05-1,0, Al=0,0-11,0, Si=0,0-6,0, Al+Si>0,5, Mn=9,0-25,0, N<20 ч./млн, железо и обычно сопутствующие стали элементы остальное, причем в зависимости от состава сплава присутствуют разные фазы, отличающаяся тем, что низкому содержанию марганца соответствует повышенное содержание углерода и повышенному содержанию марганца соответствует низкое содержание углерода, при этом парные значения C-Mn располагаются в системе координат C-Mn приблизительно на одной прямой, соединяющей линии, отстоящей от парных значений C-Mn, находящихся в равновесном состоянии между α фазой (аустенит) и фазой α' (мартенсит).

Недостатком данной стали является отсутствие азота в данной стали, что не позволяет достичь требований по значениям прочности, предъявляемых к современным сталям для демпфирующих элементов сейсмостойких сооружений.

Известна высокопрочная TWIP сталь и способ производства листа из этой стали (US 20100012233, опубл. 21.01.2010). Данная сталь содержит в вес. %: 0,15-0,3 C, 0,01-0,03% Si, 15-25% Mn, 1,2-3,0% Al, P<0,02%, 0,001-0,002% S, 4,0-5,0 Ti и остальное железо и неизбежные примеси.

Недостатком данной стали является низкое содержание углерода (до 0,3%), алюминия (1,2-3,0%), кремния (0,01-0,03%) и отсутствие азота, что не позволяет достичь требуемых высоких свойств прочности и пластичности, предъявляемых к современным сталям для демпфирующих элементов сейсмостойких сооружений.

Наиболее близким техническим решением к предложенной стали является аустенитная высокомарганцевая сталь с TWIP-эффектом (EP №1067203, опубл. 10.01.2001). Также в патенте описан способ получения полос и листов из данной стали. Изобретение описывает сталь следующего состава (вес. %): C от 0,001 до 1,6%, Mn от 6 до 30%, Ni ≤ 10%, при этом (Mn+Ni) от 16 до 30%; Si ≤ 2,5%, Al ≤ 6%, Cr ≤ 10%; (P+Sn+Sb+As) ≤ 0,2% (S+Se+Te) ≤ 0,5%; (V+Ti+Nb+W+Zr+редкоземельные) ≤ 3%; (Mo+W) ≤ 0,5%, N ≤ 0,3%, Cu ≤ 5%, остальное железо и примеси от плавки. В соответствии с этим способом тонкую

полоску толщиной от 1,5 до 10 мм разливают в литейной машине непосредственно из жидкого металла, затем данные полосы выкатываются в холодную с обжатием от 10 до 90% в один или несколько проходов, затем осуществляется рекристаллизационный отжиг полос.

5 Недостатком данной стали является пониженное содержание кремния ($Si \leq 2,5\%$), т.к. известно, что добавки кремния повышают стабильность аустенита, а также измельчают зерно, что приводит к повышению прочностных характеристик.

Задачей предлагаемого изобретения является получение высокопрочной высокомарганцевой аустенитной стали, обладающей высоким уровнем механических свойств при циклических нагрузках, которым подвержены демпфирующие элементы сейсмостойких сооружений.

Поставленная задача достигается за счет того, что высокопрочная высокомарганцевая аустенитная сталь содержит марганец (Mn), углерод (C), алюминий (Al), кремний (Si), азот (N), при этом имеет минимальное содержание вредных примесей таких как водород (H), сера (S) и фосфор (P), остальное железо и неизбежные примеси. Ультравысокопрочная сталь системы Fe-Mn-Al-C, обладающая эффектом TWIP и TRIP имеет следующее соотношение компонентов, вес. %:

20	Марганец (Mn)	9-30
	Углерод (C)	0,01–0,8
	Алюминий (Al)	0–6
	Кремний (Si)	0–6
	Азот (N)	0–0,3
	Водород (H)	не более 0,0004
	Сера (S)	не более 0,01
	Фосфор (P)	не более 0,01
25	Железо (Fe) и неизбежные примеси	остальное

Между компонентами выполняются следующие соотношения:

$$20 < 27,06 * C + 0,576 * Mn + 2,26 * Al - 2 * Si + 73 * N < 40,$$

где C, N, Mn, Si, N содержание химических элементов, вес. %.

30 Технический результат заключается в получении высокопрочной высокомарганцевой аустенитной стали, обладающей высоким уровнем механических свойств при циклических нагрузках, которым подвержены демпфирующие элементы сейсмостойких сооружений.

Введение в сталь марганца в количестве 9–30% обеспечивает нужное значение энергии дефекта упаковки. При этом введение марганца в количествах более 30% может привести к образованию хрупкой бета-фазы, что отрицательно скажется на механических свойствах стали. Введение углерода в сталь в количествах 0,01–0,8% позволяет упрочнить ее по механизму твердорастворного упрочнения. При этом углерод и марганец образуют октаэдрические кластеры, что приводит к дополнительному упрочнению по механизму DSA (dynamic strain aging – динамическое старение под напряжением). Добавление углерода в количествах больших 0,8 вес. % приводит к образованию карбидов, пагубно влияющих на пластичность стали. Алюминий добавляется в сталь для подавления эффекта отложенного разрушения [Ryu J.H., Kim S.K., Lee C.S., Suh D.-W. & Bhadeshia, H. K. D. H. Effect of aluminium on hydrogen-induced fracture behaviour in austenitic Fe-Mn-C steel. Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 469, pp. 1–14 (2012)]. Кроме того, алюминий повышает высокотемпературную пластичность сталей, что облегчает горячую прокатку. Добавки кремния (до 6 вес. %) повышают стабильность аустенита, а также измельчают зерно, что приводит к повышению прочностных характеристик. Содержание азота (0,3–0,4%) обусловлено его предельной растворимостью в твердом растворе, превышение

содержания азота может привести к образованию пористости из-за образования газообразного азота при выплавке и сварке. Особое внимание следует уделять пониженному содержанию водорода, т.к. присутствие водорода может приводить к охрупчиванию и отложенному разрушению высокопрочных высокомарганцевых аустенитных сталей [Ryu J.H., Kim S.K., Lee C.S., Suh D.-W. & Bhadeshia H. K. D. H. Effect of aluminium on hydrogen-induced fracture behaviour in austenitic Fe-Mn-C steel. Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 469, pp. 1–14 (2012)]. Высокие значения механических свойств при циклических нагрузках достигаются за счет присутствия в химическом составе элементов внедрения: углерода и азота, а также микроструктурного дизайна: присутствия наноразмерных двойников, появляющихся при деформации в результате эффекта пластичности, наведенной двойникованием [Kusakin P., Belyakov A., Haase C., Kaibyshev R. & Molodov D.A. Microstructure evolution and strengthening mechanisms of Fe–23Mn–0.3C–1.5Al TWIP steel during cold rolling. Mater. Sci. Eng. A 617, 52–60 (2014)].

Предложенный способ позволяет получить высокопрочную высокомарганцевую аустенитную сталь с эффектом пластичности, наведенной двойникованием, с высокими значениями механических свойств при циклических нагрузках. Более высокое содержание кремния по сравнению с прототипом обеспечивает более мелкое зерно и соответственно более высокие прочностные свойства.

Примеры осуществления.

Пример 1. Были отлиты два сплава предлагаемого химического состава. Стали предложенного химического состава были отлиты в индукционной печи и подвергнуты электрошлаковому переплаву. После чего стали были подвергнуты гомогенизационному отжигу и ковке. Химический состав предлагаемого сплава и прототипа представлены в таблице 1 на Фиг. 1.

Предлагаемые сплавы выплавляли в 50-кг индукционной печи и разливали в изложницы для слитков массой 25 кг. Слитки ковали и прокатывали в лист высотой 30 мм. В результате, стали предлагаемых составов обладают повышенной стойкостью к усталостному разрушению: сталь предлагаемого состава 2 имеет усталостную выносливость 460 МПа, а сталь предлагаемого состава 3 имеет усталостную выносливость 475 МПа на базе 10^5 циклов, соответственно.

Пример 2. Был отлит сплав предлагаемого химического состава. Сталь предложенного химического состава была отлита в индукционной печи и подвергнута электрошлаковому переплаву. После чего сталь была подвергнута гомогенизационному отжигу и ковке. Химический состав предлагаемого сплава и прототипа представлены в таблице 2 на Фиг. 2.

Сталь предлагаемого химического состава выплавляли в 50-кг индукционной печи и разливали в изложницы для слитков массой 25 кг. Слитки ковали и прокатывали в лист высотой 30 мм. В результате, сталь предлагаемого состава обладает повышенной стойкостью к усталостному разрушению: усталостная выносливость стали составляет 470 МПа на базе 10^5 циклов.

(57) Формула изобретения

1. Высокопрочная сталь системы Fe-Mn-Al-C, обладающая эффектом TWIP и TRIP, содержащая углерод, марганец, алюминий, кремний, водород, серу, фосфор, железо и неизбежные примеси, отличающаяся тем, что она дополнительно содержит азот при следующем соотношении компонентов, вес. %:

марганец (Mn)

9-30

	углерод (C)	0,01–0,8
	алюминий (Al)	0,01–1,0
	кремний (Si)	0–6
	азот (N)	0,015–0,4
5	водород (H)	не более 0,0004
	сера (S)	не более 0,01
	фосфор (P)	не более 0,01
	железо (Fe) и неизбежные примеси	остальное

2. Сталь по п.1, отличающаяся тем, что содержание компонентов удовлетворяет следующему соотношению:

10 $20 < 27,06 \times C + 0,576 \times Mn + 2,26 \times Al - 2 \times Si + 73 \times N < 40,$
 где C, N, Mn, Si, Al, N - содержание соответствующего химического элемента, вес. %.

15

20

25

30

35

40

45

**Ультравысокопрочная сталь системы Fe- Mn- Al- C,
обладающая эффектом TWIP и TRIP**

Таблица 1

Химический состав предлагаемого сплава и прототипа, вес. %

	C	Mn	Al	Si	N	S	P	H	Ni	Cr	Cu	Fe
1	0,57	21,47	0,003	0,038	0,034	0,005	0,009	-	0,03	0,005	0,003	баланс
2	0,4	23	0,01	1,9	0,11	0,003	0,005	0,002	0,004	0,015	0,007	баланс
3	0,58	17,9	0,044	0,033	0,083	0,004	0,007	0,003	0,009	0,005	0,012	баланс

1 – Прототип, 2 – Предлагаемый сплав, 3 – Предлагаемый сплав.

Фиг. 1

Таблица 2

Химический состав предлагаемого сплава и прототипа, вес. %

	C	Mn	Al	Si	N	S	P	H	Ni	Cr	Cu	Fe
1	0,57	21,47	0,003	0,038	0,034	0,005	0,009	-	0,03	0,005	0,003	баланс
2	0,014	28,8	0,89	-	0,015	0,002	0,001	0,002	0,007	0,006	0,008	баланс

1 – Прототип, 2 – Предлагаемый сплав.

Фиг. 2