

УДК 669.017.7:621.78-976

## ВЛИЯНИЕ Al И Si НА ОБРАЗОВАНИЕ АУСТЕНИТА В МЕЖКРИТИЧЕСКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР В Cr–Ni–Mo-СТАЛИ\*

**Гервасьев М.А.**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой металловедения

**Юровских А.С.**, к.т.н., доцент кафедры «Термообработка

и физика металлов» (artem.yurovskikh@mail.ru)

**Беликов С.В.**, к.т.н., доцент кафедры «Термообработка и физика металлов»

**Маслова О.В.**, ст. преподаватель кафедры металловедения

**Жилин А.С.** к.т.н., доцент кафедры металловедения (zh-al@yandex.ru)

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** В работе проанализировано влияние дополнительного легирования алюминием и кремнием стали 35ХН1М2ФА с целью изучения влияния указанных легирующих элементов на процессы образования аустенита. Сталь 35ХН1М2ФА, используемая в тяжелом и энергомашиностроении, была выбрана для изучения в связи с необходимостью дополнительного улучшения комплекса механических свойств, в особенности пластичности и ударной вязкости. Методом высокотемпературного структурного анализа получены данные о соотношении  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз в анализируемых сплавах. На основании результатов исследования рассчитаны критические точки  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  и сделан вывод о том, что дополнительное легирование алюминием стали 35ХН1М2ФА приводит к расширению межкритического интервала температур, в то время как дополнительное введение кремния в сталь смещает межкритический интервал температур в высокотемпературную область. Изучение изменения параметра кристаллической решетки аустенита показало, что ее минимальный параметр в стали 35ХН1М2ФА наблюдается при температуре 740 °С. Кремний, и в особенности алюминий, повышают эту температуру до 760 и 780 °С соответственно.

**Ключевые слова:** аустенит, хромо-никель-молибденовая сталь, легирование, алюминий, кремний.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-677-681

Закалка из межкритического интервала температур  $A_{c1} - A_{c3}$  с получением двухфазной феррито-мартенситной структуры является эффективным способом повышения комплекса механических свойств, в особенности пластичности и ударной вязкости [1 – 3]. Образование двухфазной области связано со значительным перераспределением углерода между фазами, причем при разных температурах межкритического интервала это перераспределение изменяется [2 – 3]. Кроме перераспределения углерода обнаружено изменение концентрации легирующих элементов в  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фазах. В частности, изменение концентрации фосфора приводит к отсутствию отпускной хрупкости в сталях [2 – 3].

Ранее закалка из межкритического интервала использовалась в автомобилестроении исключительно как стадия термической обработки малоуглеродистых сталей, что обеспечивало глубокую вытяжку, высокое качество штампуемой поверхности и повышенную прочность [1]. Применение закалки из межкритического интервала для среднеуглеродистых комплексно-легированных сталей затруднено в связи с тем, что межкритический интервал имеет сравнительно узкую температурную область. Однако авторами работ [4 – 7]

показано, что легирование ферритообразующими элементами Si и Al приводит к расширению указанной температурной области.

Целью настоящей работы являлось изучение влияния легирования кремнием и алюминием на ширину межкритического интервала температур в среднеуглеродистых комплексно-легированных сталях с оценкой перераспределения углерода между фазами при аустенитизации.

В качестве материала выбрана промышленная сталь для ответственных крупных поковок 35ХН1М-2ФА. В дополнение к ней были выплавлены две стали: одна, легированная 1 % Al, и вторая, легированная 1 % Si. Химический состав сталей приведен в табл. 1. Основным методом анализа образования аустенита в межкритическом интервале температур являлся метод высокотемпературного рентгеноструктурного анализа, в результате которого определялось соотношение  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз при нагревании, а также проводилась оценка параметров их кристаллических решеток. Анализ проводился на дифрактометре Bruker D8 Advance в диапазоне углов дифракции  $2\theta = 48 - 101^\circ$  в излучении  $K\alpha$  Co с шагом  $0,04^\circ$  с использованием позиционно-чувствительного детектора LynxEye, эквивалентное время на шаг 93 с.

\* Авторы работы выражают благодарность за активное участие в работе студентам Т. Акепишевой и В. Филиппию.

Таблица 1

Химический состав сталей, % (по массе)

Table 1. Chemical composition of the analyzed steels

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	V
35XH1M2ФА	0,39	0,25	0,78	1,65	1,31	0,46	0,01	0,13
35XH1M2ФСА	0,36	0,96	0,60	1,45	1,32	0,42	0,01	0,11
35XH1M2ФЮА	0,36	0,27	0,54	1,39	1,48	0,42	0,84	0,10

По данным рентгенограмм сталей (рис. 1) видно, что интенсивность линий  $\alpha$ -фазы с повышением температуры уменьшается, а  $\gamma$ -фазы увеличивается, вместе с этим основные линии  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз не только изменяют свою интенсивность, но и в незначительной степени смещаются, что свидетельствует об изменении параметра кристаллических решеток этих фаз. На основании полученных данных построена зависимость изменения объемной доли  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз от температуры при нагревании в области, включающей межкуритический интервал (рис. 2). Полученные результаты доказывают, что основное количество аустенита образуется вблизи точки  $A_{c1}$ , что соответствует превращению перлита в аустенит. Дальнейшее повышение температуры приводит к исчезновению избыточного феррита и полной аустенитизации сталей. Данное поведение в большей степени характерно для сталей, легированных алюминием и кремнием (рис. 2).

По данным рентгенограмм определены критические точки для исследуемых сталей (табл. 2). Разница в значениях  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  связана с различным размером образ-

цов и скоростью их нагрева. Показано, что алюминий расширяет межкуритический интервал температур, а кремний сдвигает его в область более высоких температур.

Проанализировано изменение параметра кристаллической решетки феррита при нагревании (рис. 3). Параметр кристаллической решетки феррита также снят при комнатной температуре. Во всем диапазоне температур наблюдается линейная зависимость параметра кристаллической решетки от температуры для всех исследуемых сталей, что связано с термическим расширением кристаллической решетки феррита и не позволяет сделать вывод о количественном перераспределении углерода.

Анализ изменения параметра кристаллической решетки аустенита при температурах до 700 °С показал полное соответствие с теоретическими представлениями о фазовых превращениях в классических системах Fe–C (рис. 4). Дальнейший нагрев приводит к уменьшению концентрации углерода до концентрации углерода в стали. Действительно, при темпера-

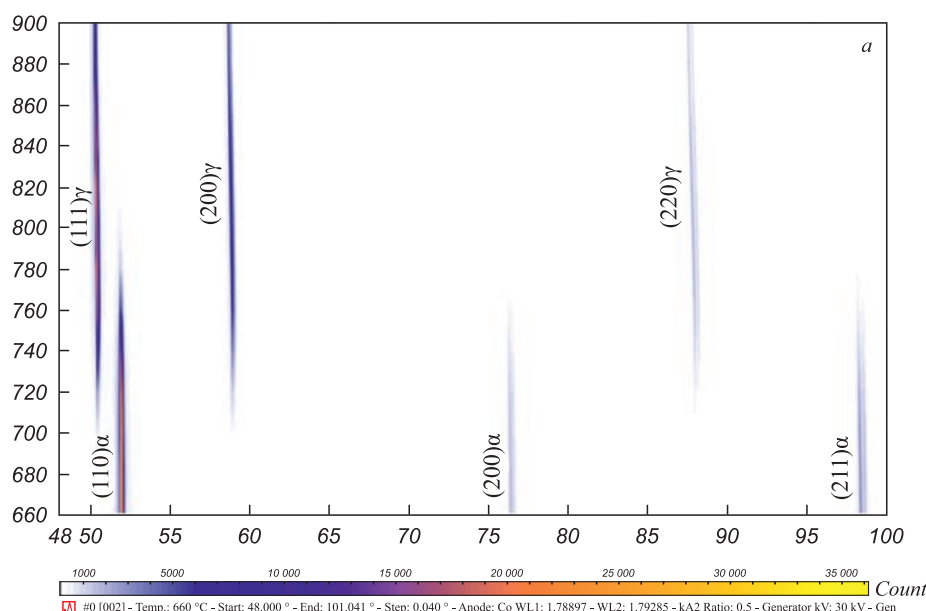


Рис. 1. Рентгенограммы анализируемых сталей:  
а – 35XH1M2ФА

Fig. 1. X-ray pictures of the analyzed steels:  
а – 35KhN1M2FA

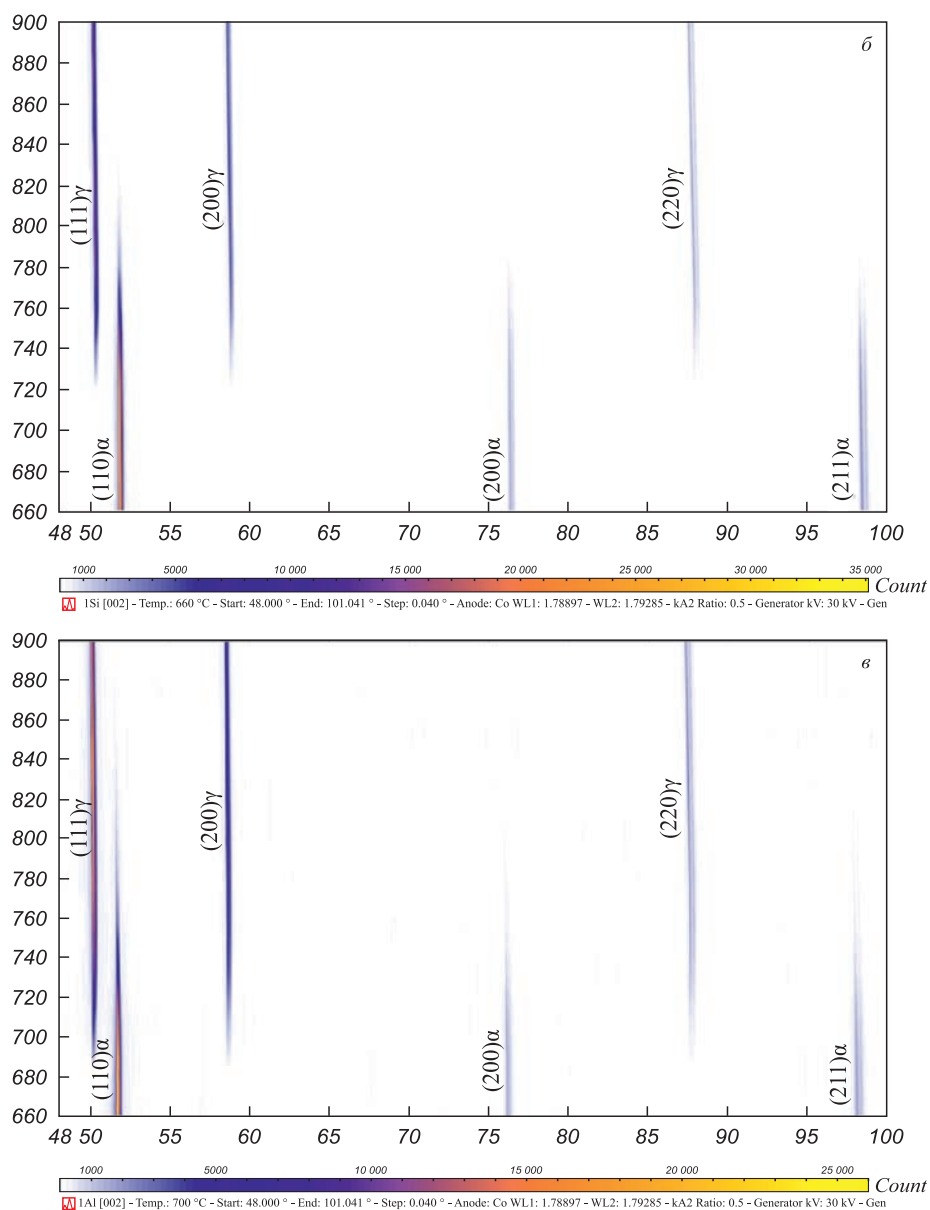


Рис. 1 (продолжение). Рентгенограммы анализируемых сталей:

б – 35ХН1М2ФСА; в – 35ХН1М2ФЮА

Fig. 1. X-ray pictures of the analyzed steels:

б – 35KhN1M2FSA; в – 35KhN1M2FYuA

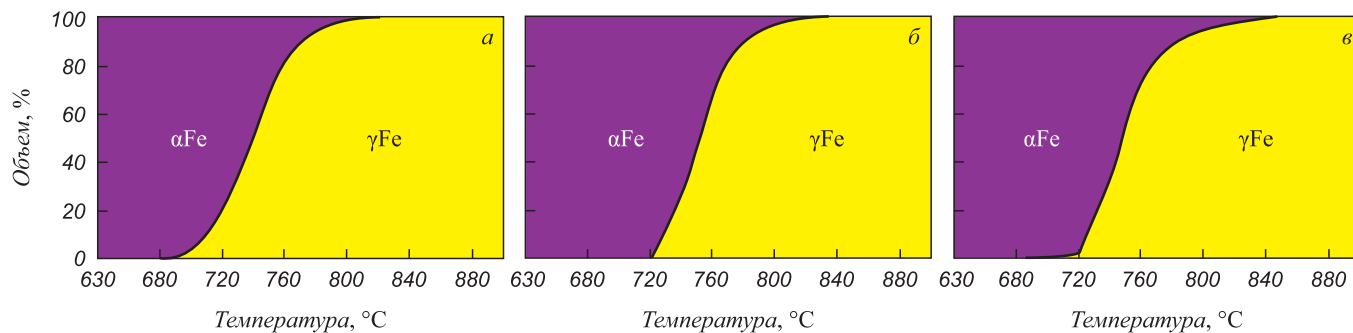


Рис. 2. Зависимость соотношения объемных долей α- и γ-фаз от температуры:

а – 35ХН1М2ФА; б – 35ХН1М2ФСА; в – 35ХН1М2ФЮА

Fig. 2. Dependence of volume percentage of α- and γ-phases from temperature:

а – 35KhN1M2FA; б – 35KhN1M2FSA; в – 35KhN1M2FYuA

Таблица 2

Критические точки анализируемых сталей

Table 2. Critical points of the analyzed steels

Марка стали	$A_{c1}$	$A_{c3}$
35ХН1М2ФА	680	820
35ХН1М2ФСА	720	840
35ХН1М2ФЮА	680	860

турах, близких к  $A_{c1}$ , параметр кристаллической решетки аустенита несколько снижается. Минимальный параметр кристаллической решетки аустенита в стали 35ХН1М2ФА наблюдается при температуре 740 °С. Кремний и, в особенности, алюминий повышают эту температуру до 760 и 780 °С соответственно. Данное резкое увеличение параметра кристаллической решетки аустенита может быть обусловлено несколькими

причинами. Во-первых, оказывает влияние термическое расширение кристаллической решетки в целом. Во-вторых, происходит растворение карбидных фаз, образованных сильными карбидообразующими элементами, такими как хром, молибден и ванадий. Процессы растворения карбидных фаз приводят к увеличению концентрации углерода в  $\gamma$ -твердом растворе и последующему увеличению параметра кристаллической решетки аустенита.

Таким образом показано, что дополнительное легирование алюминием стали 35ХН1М2ФА приводит к расширению межкритического интервала температур, в то время как дополнительное введение кремния в сталь смещает межкритический интервал температур в высокотемпературную область.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гервасьев М.А., Кутыин А.Б. Хладостойкие стали для крупных поковок и отливок. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 219 с.

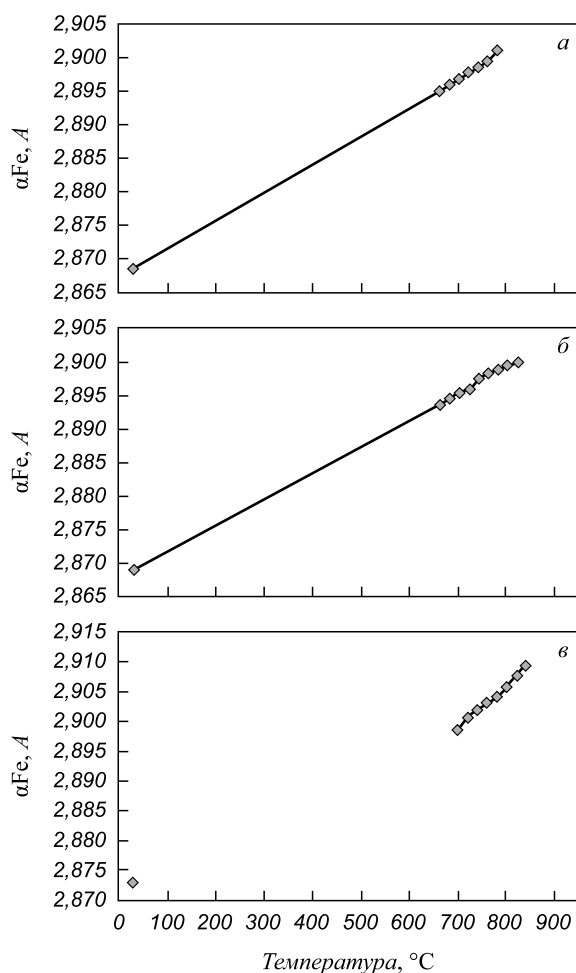


Рис. 3. Изменение параметра кристаллической решетки феррита при нагревании для анализируемых сталей:  
а – 35ХН1М2ФА; б – 35ХН1М2ФСА; в – 35ХН1М2ФЮА

Fig. 3. Lattice constant behavior of ferrite under heating for the analyzed steels:  
а – 35KhN1M2FA; б – 35KhN1M2FSA; в – 35KhN1M2FYuA

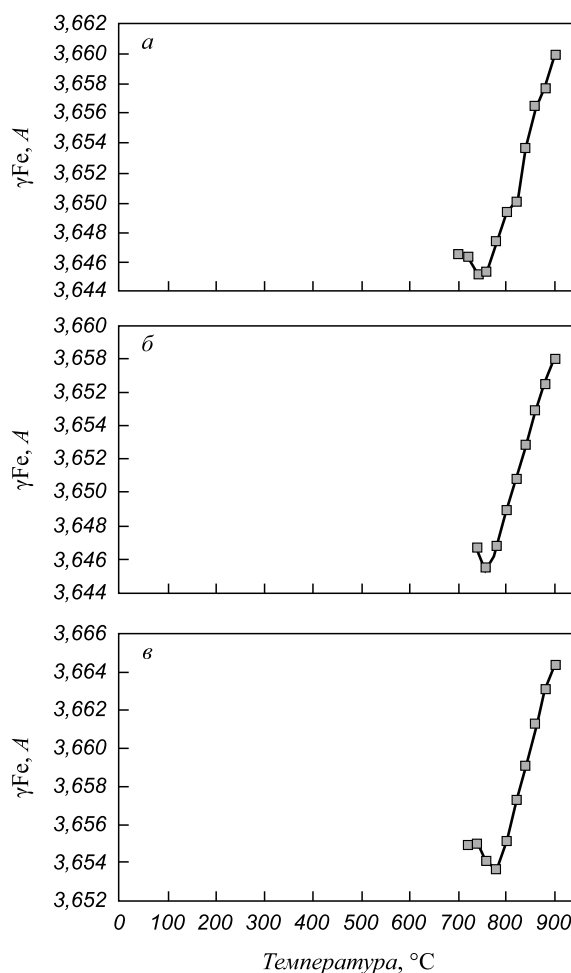


Рис. 4. Изменение параметра кристаллической решетки аустенита при нагревании для анализируемых сталей:  
а – 35ХН1М2ФА; б – 35ХН1М2ФСА; в – 35ХН1М2ФЮА

Fig. 4. Lattice constant behavior of austenite under heating for the analyzed steels:  
а – 35KhN1M2FA; б – 35KhN1M2FSA; в – 35KhN1M2FYuA

2. Беликов С.В., Сергеева К.И., Корниенко О.Ю. и др. Особенности формирования структуры и свойств сталей с гетерогенной бейнито-мартенситной структурой для газонефтепроводов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. № 12. С. 9 – 14.
3. Хотинков В.А., Ощук С.В., Фарбер В.М. Структура и механические свойства среднеуглеродистых сталей после нагрева в межкритический интервал // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. № 11. С. 31 – 35.
4. Кудряшова О.В., Гervas'ev M.A., Худорожкова Ю.В. Структура и свойства среднеуглеродистой Cr–Ni–Mo стали с добавлением Si и Al после закалки из двухфазной области // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 4 – 3. С. 580 – 585.
5. Nouri A., Saghaian H., Kheirandish Sh. Effects of Silicon Content and Intercritical Annealing on Manganese Partitioning in Dual Phase Steels // *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2010. Vol. 17. Issue 5. P. 44 – 50.
6. Bhadeshia H.K.D.H., Edmonds D.V. Bainite in silicon steels: new composition-property approach. Part 1 // *Metal Science*. 1983. No. 17. P. 420 – 425.
7. Гervas'ev M.A., Маслова О.В., Илларионова С.М. и др. Кинетика бейнитного превращения в Cr–Ni–Mo сталях с добавлением алюминия и кремния // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2014. № 7. С. 57 – 60.

Поступила 9 июля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 677–681.

## EFFECT OF Al AND Si ON THE FORMATION OF AUSTENITE IN INTERCRITICAL TEMPERATURE RANGE IN Cr–Ni–Mo-STEEL

**Gervas'ev M.A.**, Dr. Sci.(Eng.), Professor, Head of the Chair of Metal Science

**Yurovskikh A.S.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Physics and Heat Treatment of Metals  
(artem.yurovskikh@mail.ru)

**Belikov S.V.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Physics and Heat Treatment of Metals

**Maslova O.V.**, Senior Lecturer of the Chair of Metal Science

**Zhilin A.S.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Metal Science (zh-al@yandex.ru)

Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

**Abstract.** Aluminum and silicon alloying of Cr–Ni–Mo steel has been investigated. The described steel is used in energetic and heavy machine building engineering. The main aim of the present work was to improve mechanical properties of the steel such as plasticity and impact strength. The high temperature X-ray analysis is applied for understanding the ratio of  $\alpha$ - &  $\gamma$ -phases in various temperature ranges. The critical points were determined and it was shown that the aluminum addition expands the critical temperature region while the silicon addition only moves this region to the higher temperatures. The crystal lattice parameter of austenite is the smallest at 740 °C. Silicon addition makes this temperature higher up to 760 °C. The influence of aluminum is more intensive, the temperature is 780 °C.

**Keywords:** austenite, Cr–Ni–Mo steel, alloying, aluminum, silicon.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-677-681

## REFERENCES

1. Gervas'ev M.A., Kut'in A.B. *Khladoistoikie stali dlya krupnykh pokovok i otlivok* [Cold-resistant steel for large forgings and castings]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2010. 219 p. (In Russ.).
2. Belikov S.V., Sergeeva K.I., Kornienko O.Yu., Ashikhmina I.N., Stepanov A.I. Special features of formation of structure and properties of steels with heterogeneous bainite-martensite structure for gas and oil pipelines. *Metal Science and Heat Treatment*, 2011, vol. 52, no. 11–12, pp. 581–587.
3. Khotinov V.A., Oshchukov S.V., Farber V.M. Structure and mechanical properties of medium-carbon steels after heating in the intercritical temperature range. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 53, no. 11–12, pp. 545–549.
4. Kudryashova O.V., Gervas'ev M.A., Khudorozhkova Yu.V. The structure and properties of medium Cr–Ni–Mo-steel with the addition of Si and Al after hardening of two-phase area. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013, no. 4–3, pp. 580–585. (In Russ.).
5. Nouri A., Saghaian H., Kheirandish Sh. Effects of Silicon Content and Intercritical Annealing on Manganese Partitioning in Dual Phase Steels. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2010, Vol. 17, Issue 5, pp. 44–50.
6. Bhadeshia H.K.D.H., Edmonds D.V. Bainite in silicon steels: new composition-property approach Part 1. *Metal Science*. 1983, no. 17, pp. 420–425.
7. Gervas'ev M.A., Maslova O.V., Illarionova S.M., Romanova K.A., Zhilin A.S. Kinetics of bainite transformation of Cr–Ni–Mo steel with aluminum and silicon alloying. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 7, pp. 57–60. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The authors are grateful to the students Akepisheva T. and Filippov V. for the active participation in the work.

Received July 9, 2015