

УДК 669.017.7:621.78-976

КИНЕТИКА БЕЙНИТНОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ В Cr–Ni–Mo СТАЛЯХ С ДОБАВЛЕНИЕМ АЛЮМИНИЯ И КРЕМНИЯ

Гервасьев М.А., д.т.н., проф., зав. кафедрой металловедения

Маслова О.В., ст. преподаватель кафедры металловедения

Илларионова С.М., зав. лабораторией кафедры термообработки и физики металлов

Романова К.А., магистр кафедры металловедения

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

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. В работе проанализировано влияние легирования алюминием и кремнием Cr–Ni–Mo сталей (25X2HM, 25X2HMЮ2, 25X2HMC). Магнитометрическим методом получены количественные данные о распаде переохлажденного аустенита в температурном интервале бейнитного превращения. Для анализа кинетики бейнитного превращения использовано уравнение Аврами. Показано, что кремний понижает температурный интервал бейнитного превращения с одновременным повышением устойчивости переохлажденного аустенита. Однако при длительных выдержках может происходить распад остаточного аустенита по перлитному механизму. Алюминий в анализируемых сплавах смещает область протекания бейнитного превращения в область более высоких температур с резким уменьшением инкубационного периода протекания бейнитного превращения. На основании этих данных сделан вывод о нецелесообразном легировании алюминием сталей для крупногабаритных изделий, так как при непрерывном охлаждении это приводит к уменьшению дисперсности бейнита и ухудшению свойств бейнитных сталей.

Ключевые слова: кинетика бейнитного превращения, хромоникельмолибденовая сталь, легирование, алюминий, кремний.

В последние годы бейнитные стали широко применяются при производстве различных металлоконструкций, труб различного диаметра и назначения, горнодобывающей и транспортной техники.

Кроме того, из многочисленных экспериментальных и расчетных исследований температурных полей крупногабаритных изделий известно, что в процессе их термообработки разные части изделий длительное время находятся в температурном интервале промежуточного превращения переохлажденного аустенита. И как показали экспериментальные исследования структуры крупных заготовок [1], бейнитная структура является основной структурой стали.

Свойства сталей с бейнитной структурой в большой степени зависят от температурно-временных условий протекания распада переохлажденного аустенита [2].

В ряде работ было показано, что легирование Cr–Ni–Mo сталей кремнием позволяет получать малоуглеродистый бейнитный феррит и сохранять обогащенный углеродом остаточный аустенит [3]. Эффект стабилизации аустенита достигается также в сталях, легированных алюминием [4]. Для достижения нужного

эффекта необходимо контролировать по температуре и времени распад аустенита по второй ступени. Поэтому в настоящей работе ставилась задача получения количественных данных по кинетике бейнитного превращения в комплекснолегированных сталях для крупных заготовок, дополнительно легированных Si и Al.

В данном исследовании использовались хромоникельмолибденовые стали с добавлением алюминия и кремния. Химический состав сталей приведен в табл. 1.

Исследованные стали выплавляли в индукционной печи с объемом загрузки 90 кг и разливали в слитки весом 16 кг. Ковку проводили с обжатием более 90 % на прутки квадратного сечения со стороной 14 мм. Затем отжигали для получения равновесной структуры и далее в холодную прокатывали на круг диам. 5 мм. Из прутка вырезали образцы длиной 60 мм для магнитометрических исследований.

Кинетику бейнитного превращения изучали с помощью магнитометра Штейнберга [5]. Проведенные исследования позволили определить как интервал бейнитного превращения, так и степень превращения при определенных изотермических выдержках.

Таблица 1

Химический состав сталей, % (по массе)

Марка стали	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Al	Fe
25X2HM	0,28	0,23	0,16	2,43	0,80	0,24	0,02	95,84
25X2HMЮ2	0,25	0,26	0,20	2,21	0,73	0,25	2,80	93,30
25X2HMC	0,29	1,64	0,69	2,05	0,75	0,23	0,03	94,32

Температуры начала мартенситного и бейнитного превращения (Мн и Бн), определенные экспериментально, сравнивались с температурами Мн и Бн, рассчитанными по формулам, приведенным в работах [6, 7] (табл. 2).

Расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются для базовой стали и стали с кремнием. Для

стали с алюминием в литературе нет надежных данных о температурах Мн и Бн.

Кривые процентного содержания продуктов распада для образцов заданной стали от времени выдержки в изотермических условиях при температуре переохлаждения представлены на рис. 1.

Если стали 25X2НМ и 25X2НМЮ2 характеризуются равномерным повышением степени распада переохлажденного аустенита от времени выдержки, то для стали 25X2НМС наблюдается ярко выраженный перегиб, где можно выделить две стадии распада. Это может быть связано с образованием на первой стадии бескарбидного бейнита и распадом обогащенного аустенита на второй стадии.

Главной особенностью представленных на рис. 1 кинетических кривых образования бейнита является незавершенность превращения в изотермических условиях. С повышением температуры изотермической выдержки увеличивается содержание остаточного аустенита. Процентное содержание остаточного аустенита приведено в табл. 3.

По данным магнитометрических испытаний были построены С-образные кривые бейнитного превращения (рис. 2). Видно, что алюминий и кремний резко меняют кинетику бейнитного превращения.

Кремний понижает температурный интервал бейнитного превращения и повышает устойчивость переохлажденного аустенита в этом температурном интервале.

Таблица 2

Температура начала мартенситного и бейнитного превращений, °С

Показатель	Марка стали		
	25X2НМ	25X2НМЮ2	25X2НМС
Мн ^{теор}	330	395	305
Мн ^{эксп}	325	375	305
Бн ^{теор}	520	540	500
Бн ^{эксп}	510	520	480

Таблица 3

Процентное содержание остаточного аустенита

Сталь 25X2НМ				
Температура, °С	350	380	400	440
A _{ост} , %	6	12	18	48
Сталь 25X2НМЮ2				
Температура, °С	380	400	420	
A _{ост} , %	10	25	35	
Сталь 25X2НМС				
Температура, °С	320	340	360	380
A _{ост} , %	12	18	27	64

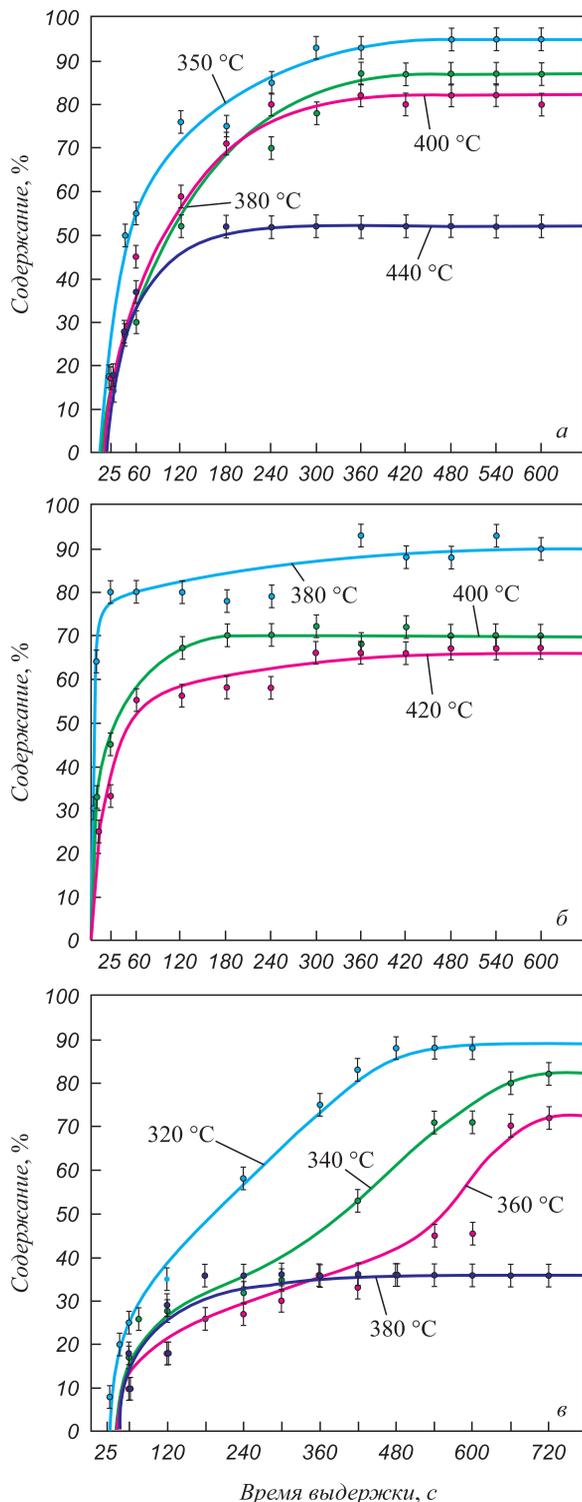


Рис. 1. Содержание продуктов распада от времени выдержки для стали: а – 25X2НМ; б – 25X2НМЮ2; в – 25X2НМС

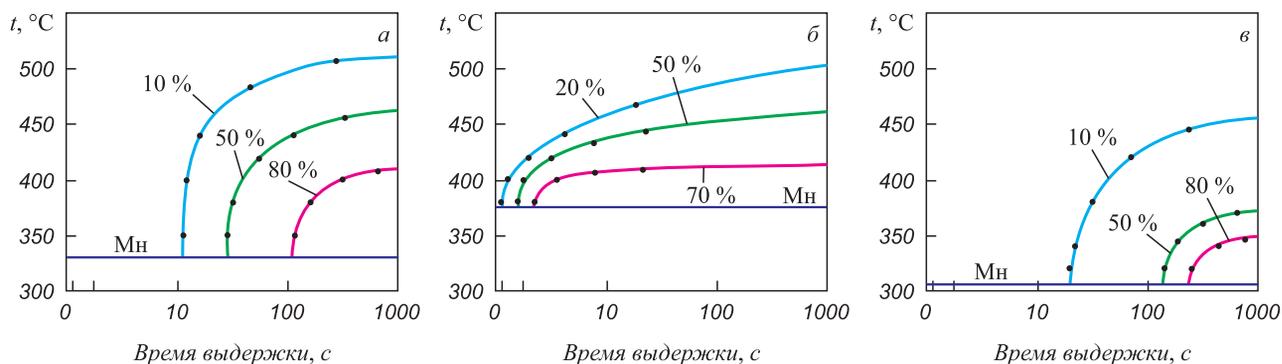


Рис. 2. S-образная кривая бейнитного превращения для стали 25X2HM (а), 25X2HMЮ2 (б) и 25X2HMC (в)

Алюминий смещает область протекания бейнитного превращения в область более высоких температур, при этом резко уменьшается инкубационный период протекания бейнитного превращения.

Анализируя данные для сталей с алюминием, необходимо учитывать, что такие стали в процессе термообработки интенсивно обезуглероживаются, что может существенно влиять на кинетику превращения.

Для количественного описания кинетики бейнитного превращения в работе было использовано уравнение Аврами

$$f = 1 - \exp(-A\tau^n).$$

Чтобы определить параметры этого уравнения, были построены графики зависимости $\ln \ln \frac{1}{1-f}$ от $\ln \tau$ (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что графики для бейнитного превращения представляют собой зависимости, близкие к линейным, наклон которых определяется значением параметра n . Значения параметра n при разных температурах колеблются в некотором интервале, средние значения этого параметра для исследованных сталей при разных температурах приведены в табл. 4. Смена значений n связана со сменой механизма превращения. Параметру n , равному 1–2, соответствует бейнитное превращение, лимитируемое диффузией углерода [8]. Значение параметра n , равное 3–4, свидетельствует о эвтектоидном распаде непревращенного аустенита.

Показано, что в процессе изотермической выдержки значение параметра n меняется незначительно как при изменении времени, так и температуры. Это говорит об одинаковом механизме бейнитного превращения для исследованных сталей.

Исключением является сталь с Si при температурах 320–360 °С. В этом случае параметр n при длительных выдержках увеличивается до 3–4. Значения n для второй стадии превращения при длительных выдержках приведены в табл. 4 в скобках. Это говорит о протекании процесса, близкого к перлитному, что может быть связано с распадом непревращенного аустенита.

Таким образом, алюминий и кремний оказывают существенное влияние на кинетику бейнитного прев-

ращения. Так, алюминий смещает интервал бейнитного превращения в область более высоких температур, при этом резко уменьшает устойчивость переохлажденного аустенита. Поэтому легирование сталей для круп-

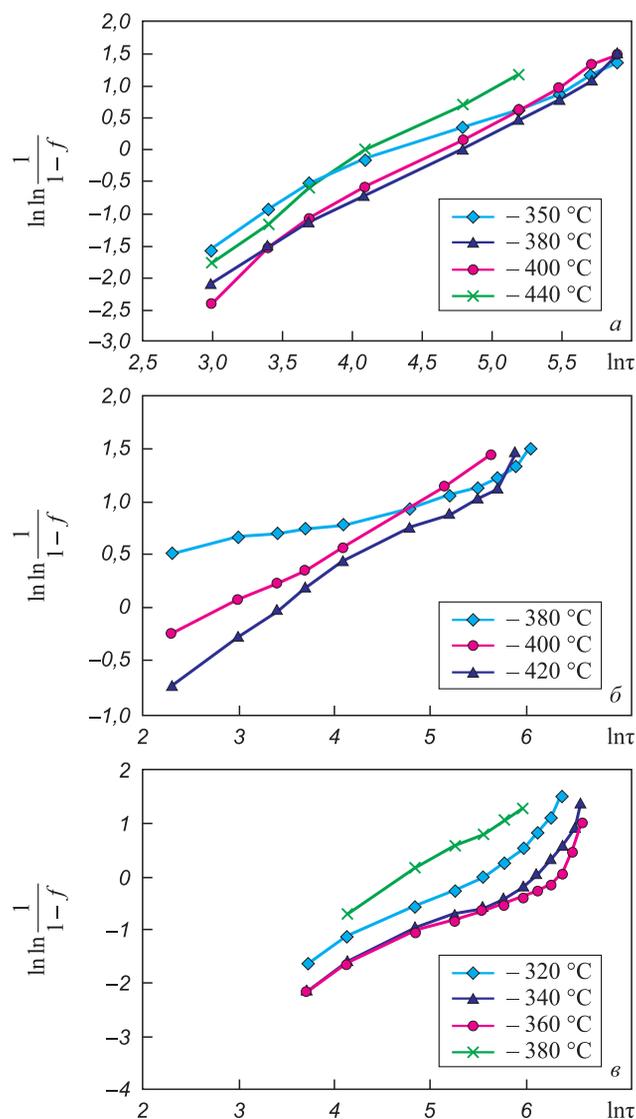


Рис. 3. Зависимость $\ln \ln \frac{1}{1-f}$ от $\ln \tau$ для бейнитного превращения стали: а – 25X2HM; б – 25X2HMЮ2; в – 25X2HMC

Таблица 4

Значение параметра *n* для бейнитного превращения при различных температурах

25X2HM				
Температура, °С	350	380	400	440
<i>n</i>	1,1	1,3	1,4	2,1
25X2HMЮ2				
Температура, °С	380	400	420	
<i>n</i>	0,7	0,8	1,0	
25X2HMC				
Температура, °С	320	340	360	380
<i>n</i>	1,2 (3,1)	1,4 (3,6)	1,3 (3,0)	1,1

ногабаритных изделий алюминием не целесообразно, так как при непрерывном охлаждении это приведет к уменьшению дисперсности бейнита и ухудшению свойств бейнитных сталей.

Легирование кремнием, наоборот, понижает интервал бейнитного превращения и повышает устойчивость переохлажденного аустенита, что позволяет получать более благоприятную структуру в сталях. Однако дли-

тельные выдержки в сталях с кремнием могут приводить к распаду остаточного аустенита по перлитному механизму.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гервасьев М.А., Кутын А.Б. Хладостойкие стали для крупных поковок и отливок. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010.
2. Юдин Ю.В., Гервасьев М.А., Беликов С.В. // Физика металлов и металловедение. 1999. Т. 88. № 2 С. 108 – 110.
3. Калетин Ю.М., Рыжков А.Г., Калетин А.Ю. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1989. № 6. С. 96 – 99.
4. Голиков В.М., Коган Л.И., Новиков Б.А., Энтин Р.И. // Физика металлов и металловедение. 1980. Т. 49. С. 665 – 667.
5. Черепин В.Т. Экспериментальная техника в физическом материаловедении. – Киев: Техника, 1986. – 280 с.
6. Попова Л.Е., Попов А.А. Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-растворах в сплавах титана: Справочник термиста. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1991. – 503 с.
7. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in steel. Second edition. Cambridge University Press, 2001. – 454 p.
8. Физическое материаловедение / Под ред. Р. Кана. Вып. 2. Фазовые превращения. Металлография: Пер. с англ. – М.: Мир, 1968. – 490 с.

© 2014 г. Гервасьев М.А., Маслова О.В., Илларионова С.М., Романова К.А., Жилин А.С.
Поступила 30 апреля 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2014. No. 7. Vol. 57, pp. 57–60.

KINETICS OF BAINITE TRANSFORMATION OF Cr–Ni–Mo STEEL WITH ALUMINUM AND SILICON ALLOYING

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

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

Illarionova S.M., Head of the laboratory of the Chair of Heat Treatment and Physics of Metals

Romanova K.A., Master degree student

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

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

Abstract. The authors have investigated aluminum and silicon alloying of Cr–Ni–Mo steels. Quantitative data on undercooling austenite decomposition under bainite transformation temperature range was obtained by magnetometric method. The Avrami equation was adopted for the kinetics of bainite transformation analysis. It was shown that the silicon addition reduces the temperature range of bainite transformation and increases the stability of undercooling austenite. However, long durations of holding may cause decomposition of undercooling austenite by perlitic mechanism. Aluminum in analyzed alloys moves the region of bainite transformation to higher temperatures, at the same time, the incubation period of bainite transformation reduces. Based on obtained data, it is recommended not to use aluminum alloying for massive billets because continuous cooling causes the decrease in dispersity of bainite and reduces mechanical properties of bainite alloys.

Keywords: kinetics of bainite transformation, Cr–Ni–Mo steel, alloying, aluminum, silicon.

REFERENCES

1. Gervas'ev M.A., Kut'in A.B. *Khladostoykie stali dlya krupnykh pokovok i otlivok* [Cold-resistant steel for large forgings and castings]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2010. (In Russ.).
2. Yudin Yu.V., Gervas'ev M.A., Belikov S.V. Isothermal transformation in the martensitic point. *FMM – Physics of Metals and Metallografiya*. 1999, Vol. 88, no. 2, pp. 108–110. (In Russ.).
3. Kaletin Yu.M., Ryzhkov A.G., Kaletin A.Yu. Influence of silicon and aluminum on the properties of structural Cr–Ni–Mo steels with bainitic structure. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 1989, No. 6, pp. 96–99. (In Russ.).
4. Golikov V.M., Kogan L.I., Novikov B.A., Entin R.I. *FMM – Physics of Metals and Metallografiya*. 1980, Vol. 49, pp. 665–667. (In Russ.).
5. Cherepin V.T. *Eksperimental'naya tekhnika v fizicheskom materialovedenii* [Experimental techniques in physical materials]. Kiev: Tekhnika, 1986. 280 p. (In Russ.).
6. Popova L.E., Popov A.A. *Diyagrammy prevrashcheniya austenita v stalyakh i beta rastvorakh v splavakh titana: Spravochnik termista* [Diagrams of austenite transformation in steels and solutions in beta titanium alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1991. 503 p. (In Russ.).
7. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in steel. Second edition. *Cambridge University Press*, 2001. 454 p.
8. *Fizicheskoe materialovedenie* [Physical Materials]. Kan R. ed. Vol. 2. Moscow: Mir, 1968. 490 p. (In Russ.).

Received April 30, 2014