

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.07

УДК 669.14.018.29:539.4.015

**А.Ю. Калетин<sup>1</sup>, Ю.В. Калетина<sup>1</sup>, Ю.Н. Симонов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Институт физики металлов им. М.Н. Михеева Уральского отделения РАН,  
Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **ВЛИЯНИЕ ОТПУСКА НА СВОЙСТВА СТАЛЕЙ С БЕСКАРБИДНЫМ БЕЙНИТОМ**

Исследованы механические свойства стали 38ХС после различных режимов изотермической закалки в бейнитном интервале температур и хромоникельмолибденовых кремнистых сталей с содержанием углерода 0,18 и 0,27 % после медленного непрерывного охлаждения в бейнитной области со скоростью  $V_{\text{охл}} = 5$  °С/мин. Показано, что после таких режимов термической обработки в исследованных сталях образуется структура бескарбидного бейнита, представляющая собой двухфазную смесь обедненного по углероду бейнитного феррита и пересыщенного углеродом остаточного аустенита различной морфологии. Целью настоящей работы являлось исследование влияния отпуска при различных температурах на поведение остаточного аустенита и механические свойства сталей с бескарбидным бейнитом, полученным при изотермической закалке и медленном непрерывном охлаждении в бейнитном интервале температур. Основными методами являлись электронно-микроскопические исследования особенностей бейнитной структуры, образовавшейся при изотермических выдержках стали 38ХС и медленном непрерывном охлаждении хромоникельмолибденовых сталей 18Х2Н2СМ и 27Х2Н2СМ, определение механических свойств и измерение параметров кристаллической решетки остаточного аустенита, присутствующего в структуре сталей после различных режимов термообработки, включающих отпуск на различные температуры. Остаточный аустенит в бескарбидном бейните существенно обогащен по углероду и содержит значительную часть от общего содержания углерода в стали. Показано, что отпуск при температуре 300 °С в течение 1–2 ч повышает значения ударной вязкости изотермически закаленной стали 38ХС и сталей 18Х2Н2СМ и 27Х2Н2СМ после медленного непрерывного охлаждения, имеющих в структуре различное соотношение как нижнего реечного, так и верхнего глобулярного бейнита, остаточного аустенита и мартенсита. Установлено, что при таком отпуске происходит стабилизация остаточного аустенита за счет заметного повышения в нем содержания углерода.

**Ключевые слова:** бейнитные стали, изотермическая закалка, непрерывное охлаждение, бескарбидный бейнит, остаточный аустенит, бейнитный феррит, углерод, механические свойства, прочность, ударная вязкость.

**A.Yu. Kaletin<sup>1</sup>, Yu.V. Kaletina<sup>1</sup>, Yu.N. Simonov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch  
of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation

<sup>2</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **INFLUENCE OF TEMPERING ON THE PROPERTIES OF CARBIDE-FREE-BAINITE STEELS**

Mechanical properties of 38XC steel after different conditions of the isothermal quenching in the bainite interval of temperatures and chrome-nickel-molybdenum-silicon steels with carbon content 0,18 and 0,27 % after slow continuous cooling in the bainitic temperature range with cooling rate  $V_{cool} = 5$  °C/min were investigated. It was shown that after such heat treatments after such heat treatment the structure of carbide-free-bainite represented as two-phase mixture of carbon depleted bainitic ferrite and carbon enriched retained austenite with different morphology were formed in the investigated steels. The aim of this work was to research the influence of tempering at different temperatures on behavior of retained austenite and the mechanical properties of steels with the carbide-free-bainite formed during isothermal quenching and slow continuous cooling in the bainite range of temperatures. The main methods were electron-microscopic investigations of the peculiarities of bainite structure formed during isothermal heating of 38XC steel and slow continuous cooling of chrome-nickel-molybdenum-silicon steels 18X2H2CM and 27X2H2CM mechanical tests and measuring of crystal lattice parameters of the retained austenite presented in steels structures after different heat treatments including tempering at various temperatures. Retained austenite in such carbide-free-bainite is substantially enriched with carbon and contain the considerable part of steel total carbon content. It was shown that tempering at a temperature of 300 °C during 1-2 hours raise the values of impact strength of isothermally quenched steel 38XC and steels 18X2H2CM and 27X2H2CM after the slow continuous cooling, having in a structure different correlation of lower lath and upper globular bainite, retained austenite and martensite.

It was found that at such tempering it happen the retained austenite stabilization by means of the noticeable increasing of carbon content in it.

**Keywords:** bainitic steels, isothermal quenching, continuous cooling, carbide-free-bainite, retained austenite, bainitic ferrite, carbon, mechanical properties, strength, impact strength.

### **Введение**

Проблема использования сталей бейнитного класса для производства ответственных деталей и конструкций в настоящее время как в России, так и за рубежом является актуальной. Такие стали обладают повышенным комплексом механических и эксплуатационных свойств, достаточно технологичны и при экономном легировании характеризуются пониженной стоимостью. Интерес к переходу на стали бейнитного класса проявляют производители железнодорожных рельсов, поскольку возможности дальнейшего улучшения эксплуатационных характеристик рельсов из перлитной стали оказались исчерпаны. Это вызвало необходимость создания альтернативных сортов рельсовой стали, качество которой превосходило бы качество перлитных сталей.

Практика использования трубных сталей также показывает, что при формировании в них феррито-перлитной структуры невозможно получить требуемые функциональные характеристики. Высокие прочностные свойства этих сталей обеспечивают режимы термообработки, при которых формируется феррито-бейнитная, чисто бейнитная или бейнитно-мартенситная структуры.

Бейнитная структура имеет сложную природу и может существенно изменять свою морфологию в зависимости от содержания в стали углерода, легирующих элементов и условий охлаждения. В настоящее время о промежуточном превращении переохлажденного аустенита [1–6] и свойствах бейнита конструкционных сталей [2–10] накоплен большой материал. Проявлением многообразия бейнитной структуры в зависимости от легирования и особенностей термической обработки стали является возникновение структуры так называемого бескарбидного бейнита, представляющего собой сочетание малоуглеродистого бейнитного феррита и высокоуглеродистого остаточного аустенита. Бескарбидный бейнит может быть верхним и нижним, но в любом случае в нем отсутствуют выделения карбидов. На протяжении последних десятилетий исследованием структуры бескарбидного бейнита занимаются многие ученые в различных странах мира [6–13]. Такой значительный интерес к данной проблеме объясняется тем, что стали с подобной структурой обладают сочетанием высокой прочности и ударной вязкости [11–15].

Несмотря на большое количество данных относительно особенностей структуры бескарбидного бейнита, существует ряд нерешенных вопросов, касающихся влияния отпуска на механические свойства среднелегированных конструкционных сталей со структурой бескарбидного бейнита.

В связи с этим целью настоящей работы являлось исследование влияния отпуска при различных температурах на поведение остаточного аустенита и механические свойства сталей с бескарбидным бейнитом, полученным при изотермической закалке и медленном непрерывном охлаждении в бейнитном интервале температур.

### **Материал и методика исследования**

Исследовали структуру и свойства легированных сталей, химический состав которых приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследованных сталей, мас. %

Сталь	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	S	P
38ХС	0,39	1,45	–	0,40	1,10	–	0,017	0,022
27Х2Н2СМ	0,27	1,75	1,96	0,36	0,93	0,40	0,015	0,010
18Х2Н2СМ	0,18	1,78	2,10	0,34	0,98	0,43	0,013	0,010

Изотермическую обработку образцов из стали 38ХС для механических испытаний проводили по следующим режимам: температура аустенитизации 920 °С, выдержка 20 мин, изотермическая выдержка в щелочных ваннах при температурах 360 и 410 °С, время выдержки от 3 до 25 мин. Заготовки исследуемых сталей 18Х2Н2СМ и 27Х2Н2СМ нагревали на 870 °С, выдерживали 30 мин, после чего охлаждали с печью с постоянной скоростью  $v_{\text{охл}} = 5$  °С/мин. В результате такой обработки получали бейнитную структуру.

Микроструктуру сталей изучали электронно-микроскопическим методом на микроскопе JEM-200 СХ на фольгах, вырезанных из соответствующих образцов, приготовленных по стандартной методике. Количество остаточного аустенита измеряли магнитометрическим методом. Механические свойства определяли при комнатной температуре. Ударную вязкость определяли на образцах типа I по ГОСТ 9454–78. Для определения параметра решетки остаточного аустенита на аппарате ДРОН-3.0 в  $K_{\alpha}$ -излучении железа снимали линию  $(311)_{\gamma}$ . Содержание углерода в остаточном аустените определяли по параметру кристаллической решетки.

### Результаты исследования и их обсуждение

Сталь 38ХС широко используется в машиностроении после изотермической закалки, и выбор ее для исследования обусловлен еще и тем обстоятельством, что в практике термообработки встречаются случаи, когда после такой обработки вследствие образования верхнего бейнита не удается получить требуемый уровень конструктивной прочности.

Электронно-микроскопическое исследование показало, что при всех исследованных режимах изотермической обработки в структуре не наблюдаются выделения карбидов ни в бейнитном феррите, ни в ос-

таточном аустените. Таким образом, в стали 38ХС продуктом превращения аустенита в интервале температур 410–360 °С является бескарбидный бейнит, представляющий собой чисто феррито-аустенитную структуру.

Данные о влиянии отпуска на 300 °С на ударную вязкость, твердость, количество остаточного аустенита и содержание в нем углерода стали 38ХС после изотермической закалки при температурах 360 и 410 °С с выдержками, обеспечивающими различную степень превращения, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние режимов термообработки на механические свойства, количество остаточного аустенита (О.А.) и содержание в нем углерода в стали 38ХС после различных режимов изотермической закалки и отпуска на 300 °С

Режим изотермической закалки	Режим отпуска	Твердость НВ	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	Кол-во О.А., %	Содержание С в О.А., %	Обогащение О.А. углеродом, %
360 °С, 3 мин	Без отпуска	401	0,65	16	1,36	+0,97
	300 °С	388	1,05	13	1,5	+1,11
360 °С, 10 мин	Без отпуска	388	1,00	18	1,36	+0,97
	300 °С	375	1,1	17	1,45	+1,06
360 °С, 25 мин	Без отпуска	388	1,15	16	1,08	+1,03
	300 °С	375	1,25	15	1,42	+1,08
410 °С, 5 мин	Без отпуска	341	0,75	26	1,18	+0,79
	300 °С	321	1,20	17	1,45	+1,06
410 °С, 10 мин	Без отпуска	321	0,95	31	1,23	+0,84
	300 °С	311	1,30	21	1,39	+1,0

Видно, что отпуск повышает значения ударной вязкости изотермически закаленной стали, имеющей в структуре различное соотношение бейнита, мартенсита и остаточного аустенита. Это справедливо по

отношению как к речному – нижнему бейниту, так и к глобулярному – верхнему бейниту. Такой отпуск после изотермической закалки при температуре 360 °С с выдержкой 3 мин и при температуре 410 °С с выдержками 5–10 мин приводит к повышению ударной вязкости на 0,3–0,4 МДж/м<sup>2</sup>, некоторому понижению твердости, существенному уменьшению количества остаточного аустенита и обогащению его углеродом в среднем на 0,2 %. При увеличении времени изотермической выдержки, т.е. при дальнейшем развитии бейнитного превращения, которое сопровождается увеличением содержания углерода в остаточном аустените, значения ударной вязкости после отпуска повышаются в среднем на 0,1 МДж/м<sup>2</sup>, а количество остаточного аустенита уменьшается незначительно.

При всех режимах изотермической закалки после отпуска повышается содержание углерода в остаточном аустените. По-видимому, это связано с тем, что при отпуске на 300 °С бейнитное превращение продолжается и некоторая часть остаточного аустенита превращается в бейнитный феррит без выделения карбидов. При этом количество остаточного аустенита уменьшается, а содержание углерода в нераспавшейся части остаточного аустенита увеличивается (см. табл. 2).

Таким образом, при сохранении бескарбидного бейнита в процессе нагрева и выдержки при температуре 300 °С изотермически закаленной стали 38ХС не только происходит отпуск присутствующего мартенсита, образовавшегося во время охлаждения от температуры изотермической закалки при непродолжительных выдержках, но и стабилизируется остаточный аустенит, и это обуславливает повышение вязкости стали с бейнитной структурой.

Полученные результаты открывают новый аспект в назначении низкотемпературного отпуска, заключающийся не только в снятии напряжений заваленной бейнитной стали, но и в дополнительном обогащении остаточного аустенита углеродом, его стабилизации, обеспечивающей высокую вязкость стали в высокопрочном состоянии.

В отличие от изотермической закалки, когда бейнитную структуру получают преднамеренно, образование бейнита при закалке в центральных участках массивных изделий является нежелательным, но довольно частым явлением. При этом образование бейнитной структуры протекает во всем температурном интервале превращения. При непрерывном охлаждении исследованных сталей 18Х2Н2СМ и

27Х2Н2СМ формируется структура, состоящая из кристаллов бейнитного феррита реечной и глобулярной формы, остаточного аустенита с различным содержанием углерода, при распаде которого дополнительно может образовываться мартенсит. Электронно-микроскопические исследования показали, что отличительной особенностью структуры бейнита исследованных хромоникельмолибденовых сталей является полное отсутствие карбидов. Естественно, что сталь с такой структурой необходимо отпускать. Как видно из табл. 3, ударная вязкость сталей 18Х2Н2СМ и 27Х2Н2СМ после такого отпуска несколько повышается при сохранении твердости на уровне неотпущенных образцов.

Таблица 3

Влияние режимов термообработки на механические свойства, количество остаточного аустенита (О.А.) и содержание в нем углерода в сталях 18Х2Н2СМ и 27Х2Н2СМ с исходной бейнитной структурой

Марка стали	Режим отпуска	Твердость НВ	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	Кол-во О.А., %	Содержание С в О.А., %	Обогащение О.А. углеродом, %
18Х2Н2СМ	Без отпуска	352	0,9	16	1,0	+0,82
	300 °С	352	1,0	14	1,13	+0,95
	400 °С	352	0,8	13	0,95	+0,77
	500 °С	352	0,7	10	0,87	+0,69
27Х2Н2СМ	Без отпуска	352	0,85	22	1,08	+0,8
	300 °С	363	0,90	19	1,26	+1,0
	400 °С	363	0,75	18	1,17	+0,9
	500 °С	363	0,45	13	1,08	+0,8

Результаты рентгеноструктурного анализа исследуемых сталей с бейнитной структурой, образовавшейся при непрерывном охлаждении с печью до и после отпуска на 300 °С, приведены в табл. 3. Как и в случае изотермической закалки стали 38ХС, низкотемпературный отпуск приводит к некоторому уменьшению количества остаточного ау-

стенита в структуре сталей 18X2H2CM и 27X2H2CM соответственно на 2 и 4 %, при этом происходит увеличение параметра решетки гамма-фазы. Согласно расчетам, проведенным по методике [1], содержание углерода в остаточном аустените в случае 300-градусного отпуска повышается на 0,1–0,2 %. По-видимому, это связано с распадом остаточного аустенита во время отпуска по бейнитному механизму, и некоторая его часть превращается в бейнитный феррит без выделения карбидов. На эту возможность указывает тот факт, что, несмотря на уменьшение количества остаточного аустенита, общее количество углерода, находящегося в аустените после отпуска, практически не изменяется и составляет 0,16 % для стали 18X2H2CM и 0,2 % для стали 27X2H2CM (см. табл. 3).

Обогащение остаточного аустенита после отпуска при температуре 300 °С происходит в исследуемых сталях не только с бейнитной, но и с бейнитно-мартенситной структурой, образующейся после охлаждения на воздухе. Содержание углерода в остаточном аустените повышается в стали 18X2H2CM почти на 0,2 %, а в стали 27X2H2CM – на 0,4 % (см. табл. 3). И в сталях с бейнитно-мартенситной структурой общее количество углерода, находящегося в остаточном аустените, до и после отпуска практически не изменяется.

Проведенное электронно-микроскопическое исследование сталей 18X2H2CM и 27X2H2CM с бейнитной структурой после отпуска на 300 °С не выявило существенных изменений. В структуре обеих сталей наблюдаются глобулярные и речные кристаллы бейнитного феррита с участками остаточного аустенита. Выделений карбидов ни в бейнитном феррите, ни в остаточном аустените обнаружено не было.

Можно заключить, что низкотемпературный отпуск сталей со структурой бескарбидного бейнита, не вызывающий выделение карбидов, приводит к обогащению остаточного аустенита углеродом, т.е. к его стабилизации и, как следствие, к повышению сопротивления стали ударному разрушению. Наблюдается также некоторое повышение ударной вязкости при испытаниях в области отрицательных температур: при температуре –60 °С ударная вязкость стали 27X2H2CM с бейнитной структурой составляет 0,50 МДж/м<sup>2</sup>, а после 300-градусного отпуска – 0,55 МДж/м<sup>2</sup>. Это решает проблему широкого использования низкоуглеродистых хромоникельмолибденовых сталей, рекомендуемых для массивных деталей. Как уже указывалось в работе [11], при



непрерывном охлаждении от температуры аустенизации в различных участках по сечению образцов из сталей 10X2H3ГМ, 14X2H2ГМФ, 18X2H2СМ, 27X2H2СМ образуется бескарбидный глобулярный и речный бейнит, сохраняется остаточный аустенит и не исключается вероятность образования мартенсита в участках, прилегающих к поверхности. Как показывают результаты настоящего исследования, низкотемпературный отпуск сталей с такой сложной структурой оказывается полезным.

### **Заключение**

Показано, что остаточный аустенит в бескарбидном бейните кремнистых сталей, как после изотермической закалки в интервале бейнитного превращения, так и после непрерывного охлаждения, существенно обогащен по углероду и содержит значительную часть от общего содержания углерода в стали. Установлено, что отпуск при температуре 300 °С в течение 1–2 ч повышает значения ударной вязкости изотермически закаленной стали 38ХС и сталей 18X2H2СМ и 27X2H2СМ после медленного непрерывного охлаждения, имеющих в структуре различное соотношение как речного – нижнего, так и глобулярного – верхнего бейнита, остаточного аустенита. Установлено, что при таком отпуске происходит стабилизация остаточного аустенита за счет заметного повышения в нем содержания углерода.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0134 от 01.12.2015 г. в составе мероприятия по реализации Постановления Правительства РФ № 218).*

### **Список литературы**

1. Wojarski Z., Bold T. Structure and properties of carbide-free-bainite // Acta Met. – 1974. – Vol. 22, № 10. – P. 1223–1234.
2. Калетин Ю.М., Рыжков А.Г., Калетин А.Ю. Легирование и термическая обработка сталей с бейнитной структурой // МиТОМ. – 1987. – № 10. – С. 13–17.
3. Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H. Very strong bainite // Current Opinion in Solid State and Materials Science: DK 8. – 2004. – P. 251–257.

4. Калетин А.Ю. Влияние остаточного аустенита на структуру и свойства конструкционных сталей после высокого отпуска: дис. ... канд. техн. наук. – Свердловск, 1985. – 199 с.

5. Garcia-Mateo C., Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H. Mechanical properties of low-temperature bainite // *Materials Science Forum* 500. – 2005. – P. 495–502.

6. Bhadeshia H.K.D.H., Edmonds D.V. Bainite in silicon steels: new composition-property approach. Part I // *Met. Sci.* – 1983. – Vol. 17. – P. 411–420.

7. Bhadeshia H.K.D.H., Edmonds D.V. Bainite in silicon steels: new composition-property approach. Part II // *Met. Sci.* – 1983. – Vol. 17. – P. 420–425.

8. Калетин Ю.М., Рыжков А.Г., Калетин А.Ю. Влияние кремния и алюминия на свойства конструкционных хромоникелевых сталей с бейнитной структурой // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 1989. – № 6. – С. 96–99.

9. Влияние стабильности остаточного аустенита на трещиностойкость конструкционной стали / М.Н. Георгиев, А.Ю. Калетин, Ю.Н. Симонов, В.М. Счастливец // *ФММ.* – 1990. – № 1. – С. 113–121.

10. Miihkinen V.T.T., Edmonds D.V. Microstructural examination of two experimental high-strength bainite low-alloy steels, containing silicon // *Material Science and Technology.* – 1987. – Vol. 3. – P. 422–431.

11. Калетин А.Ю., Рыжков А.Г., Калетина Ю.В. Повышение ударной вязкости конструкционных сталей при образовании бескарбидного бейнита // *ФММ.* – 2015. – Т. 116, № 1. – С. 114–120.

12. New experimental evidence of the incomplete transformation phenomenon in steel / F.G. Caballero, C. Garcia-Mateo, M.J. Santofimia, M.K. Miller, C. Garcia de Andres // *Acta Materialia.* – 2009. – № 57. – P. 8–17.

13. Atomic scale observations of bainite transformation in a high silicon steel / F.G. Caballero, M.K. Mille, S.S. Babu, C. Garcia-Mateo // *Acta Materialia.* – 2007. – № 55. – P. 381–390.

14. Структура и свойства конструкционных сталей после термомеханической обработки в бейнитной области температур / В.М. Счастливец, Ю.В. Калетина, М.А. Смирнов, А.Ю. Калетин // *Деформация и разрушение материалов.* – 2011. – № 4. – С. 1–9.

15. Yang H.-S., Bhadeshia H.K.D.H. Designing low carbon, low temperature bainite // *Materials Science and Technology*. – 2008. – Vol. 24, № 3. – P. 335–342.

### References

1. Bojarski Z., Bold T. Structure and properties of carbide-free-bainite. *Acta Metallurgica*, 1974, vol. 22, no. 10, pp. 1223-1234.

2. Kaletin Iu.M., Ryzhkov A.G., Kaletin A.Iu. Legirovanie i termicheskaiia obrabotka stalei s beinitnoi strukturoi [Alloying and heat treatment staly with beynitny structure]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 1987, no. 10, pp. 13-17.

3. Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H. Very strong bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science: DK* 8, 2004, pp. 251-257.

4. Kaletin A.Iu. Vliianie ostatochnogo austenita na strukturu i svoistva konstruktsionnykh stalei posle vysokogo otpuska [Influence of residual austenite on structure and property constructional staly after the high holiday]. Ph. D. thesis. Sverdlovsk, 1985. 199 p.

5. Garcia-Mateo C., Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H. Mechanical properties of low-temperature bainite. *Materials Science Forum* 500, 2005, pp. 495-502.

6. Bhadeshia H.K.D.H., Edmonds D.V. Bainite in silicon steels: new composition-property approach. Part I. *Metal Science*, 1983, vol. 17, pp. 411-420.

7. Bhadeshia H.K.D.H., Edmonds D.V. Bainite in silicon steels: new composition-property approach. Part II. *Metal Science*, 1983, vol. 17, pp. 420-425.

8. Kaletin Iu.M., Ryzhkov A.G., Kaletin A.Iu. Vliianie kremniia i aliuminiia na svoistva konstruktsionnykh khromonikelevykh stalei s beinitnoi strukturoi [Influence of silicon and aluminum on the properties of structural chromium-Nickel steels with bainite structure]. *Izvestiia vuzov. Chernaiia metallurgiiia*, 1989, no. 6, pp. 96-99.

9. Georgiev M.N., Kaletin A.Iu., Simonov Iu.N., Schastlivtsev V.M. Vliianie stabil'nosti ostatochnogo austenita na treshchinostoikost' konstruktsionnoi stali [Influence of stability of residual austenite on crack resistance of constructional steel]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1990, no. 1, pp. 113-121.

10. Miihkinen V.T.T., Edmonds D.V. Microstructural examination of two experimental high-strength bainite low-alloy steels, containing silicon. *Material Science and Technology*, 1987, vol. 3, pp. 422-431.

11. Kaletin A.Iu., Ryzhkov A.G., Kaletina Iu.V. Povyshenie udarnoi viazkosti konstruktsionnykh stalei pri obrazovanii beskarbidnogo beinita [Increase in impact strength constructional staly at formation of a beskarbidny beynit]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2015, vol. 116, no. 1, pp. 114-120.

12. Caballero F.G., Garcia-Mateo C., Santofimia M.J., Miller M.K., Garcia de Andres C. New experimental evidence of the incomplete transformation phe-nomenon in steel. *Acta Materialia*, 2009, no. 57, pp. 8-17.

13. Caballero F.G., Mille M.K., Babu S.S., Garcia-Mateo C. Atomic scale observations of bainite transformation in a high sili-con steel. *Acta Materialia*, 2007, no. 55, pp. 381-390.

14. Schastlivtsev V.M., Iu.V. Kaletina, M.A. Smirnov, A.Iu. Kaletin Struktura i svoistva konstruktsionnykh stalei posle termomekhanicheskoi obrabotki v beinitnoi oblasti temperatur [Structure and properties constructional stales after thermomechanical processing in beynitny area of temperatures]. *Deformatsiia i razrushenie materialov*, 2011, no. 4, pp. 1-9.

15. Yang H.-S., Bhadeshia H.K.D.H. Designing low carbon, low temperature bainite. *Materials Science and Technology*, 2008, vol. 24, no. 3, pp. 335-342.

Получено 05.10.2016

### Об авторах

**Калетин Андрей Юрьевич** (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН; e-mail: akalet@imp.uran.ru.

**Калетина Юлия Владимировна** (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН; e-mail: kaletina@imp.uran.ru.

**Симонов Юрий Николаевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металловедения, термической и лазерной обработки металлов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: mto@pstu.ru.

### **About the authors**

**Andrey Yu. Kaletín** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Senior Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: akalet@imp.uran.ru.

**Yulia V. Kaletina** (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of Russian Academy of Sciences; e-mail: kaletina@imp.uran.ru.

**Yuriy N. Simonov** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Metal Science, Laser and Heat Treatment of Metals, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: Simonov@pstu.ru.