

**А.Н. Юрченко, Ю.Н. Симонов**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА БЕЙНИТНЫХ СТАЛЕЙ**

Представлен анализ научных литературных источников по промежуточному превращению. Обобщен материал различных периодов исследования бейнитного превращения в разных странах. Выявлены основные различия между нижним и верхним бейнитом, а также показаны преимущества одной морфологии бейнита над другой. Проиллюстрированы некоторые виды бейнитной структуры при различных методах исследования структуры. Проведен терминологический анализ использования термина «бескарбидный бейнит». Выявлено использование различных названий структуры, которая получается в результате промежуточного превращения без образования карбидов. В различных литературных источниках подтверждается то, что бейнит может быть бескарбидным. Стремление получить бескарбидный бейнит связано с повышенным комплексом механических свойств у данной структуры. Образование такой структуры возможно при строгом соблюдении технологии термической обработки, именно поэтому в статье проанализированы способы термической обработки. Бескарбидный бейнит можно получить в результате непрерывного охлаждения и изотермической выдержки при добавлении в сталь элементов, которые позволяют исключить карбидообразование. Среди таких элементов выделяют кремний и алюминий. Последнее десятилетие перспективным направлением является Q&P-обработка, в результате которой происходит образование бейнито-мартенситной структуры с различным содержанием той или иной составляющей. В статье также рассмотрено проведение режимов термической обработки на традиционном печном оборудовании. Стало известно, что некоторые ученые занимаются исследованиями структуры, полученной при охлаждении из межкритического интервала. Такая обработка позволяет повысить характеристики надежности, однако до конца она еще не изучена.

**Ключевые слова:** промежуточное превращение, аустенит, мартенсит, бескарбидный бейнит, микроструктура, механические свойства, изотермическая выдержка, непрерывное охлаждение, межкритический интервал температур, термическая обработка.

**A.N. Yurchenko, Yu.N. Simonov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **MICROSTRUCTURAL FEATURES, MECHANICAL PROPERTIES AND HEAT TREATMENT OF BAINITIC STEEL**

The analysis of scientific references on intermediate transformation is presented in article. Material of various periods of research of bainite transformation in the different countries is generalized. The main distinctions between the lower and top bainite are revealed, and also advantages of one morpho-

logy of a bainite over another are shown. Some types of bainite structure at various methods of research of structure are illustrated. The terminological analysis of use of the term "carbide-free bainite" is carried out. Use of various names of structure which turns out as a result of intermediate transformation without formation of carbides is revealed. In various references what bainite is confirmed can be carbide-free bainite. The aspiration to receive carbide-free bainite is deals with the raised complex of mechanical properties at this structure. Realization of such structure is possible in strict observance of technology of heat treatment. Therefore in article ways of heat treatment are analysed. It is revealed from scientific literature that carbide-free bainite it is possible to receive as a result of continuous cooling and isothermal holding at addition in steel of elements which allow to exclude carbide forming. Distinguish silicon and aluminum from such elements. The last decade the perspective direction is Quenching & Partitioning treatment from which formation of bainite and martensite structure with various maintenance of this or that component results. In article carrying out the modes of heat treatment on the traditional furnace equipment is also considered. It became known that some scientists research the structure received when cooling from an intercritical interval.

**Keywords:** intermediate transformation, austenite, martensite, carbide-free bainite, microstructure, mechanical properties, isothermal holding, continuous cooling, intercritical interval of temperatures, heat treatment.

### **Общие представления о бейните**

Как известно, идея создания структуры бейнита зародилась в XX в. [1, 2], но интерес к исследованию промежуточного превращения не исчезает, а только еще больше возрастает в настоящее время [3–5].

Считается, что бейнит – это один из видов структурного состояния, которое возникает при превращении аустенита. Кроме того, при превращении аустенита в бейните выделяются карбиды [1, 6, 7].

Исследователи выделяют ряд особенностей промежуточного превращения, которые указывают на его аналогичность, с одной стороны, с диффузионным превращением, а с другой – с мартенситным [1, 6–8].

Ученые соглашаются с тем, что можно выделить два вида бейнита: верхний и нижний [1, 6–8], хотя существуют классификации [8–12], в которых бейнит может представлять в различных морфологических сочетаниях феррита и цементита.

В работе [13] поднимается вопрос о правильном термине для обозначения того, что образуется в результате промежуточного превращения. Предлагается использовать не какой-либо конкретный термин, например «бейнит», а говорить о промежуточной структуре с указанием фаз.

Продолжая тему бейнита, нужно сказать, что верхний бейнит образуется преимущественно при температурах 500–350 °С, а нижний – при температурах 350–200 °С [1, 6–8].

Результаты исследований, проведенных авторами работы [14], подтверждают ранние представления о морфологии бейнита, полученного при различных режимах термической обработки. Верхний бейнит имеет перистое, или «кудреватое», строение (рис. 1, *а*). Нижний бейнит, в классическом представлении, является игольчатым (рис. 1, *б*), но в современных источниках также часто упоминается и речная морфология бейнита (рис. 1, *в*). Как говорилось ранее, в бейните происходит выделение карбидов цементитного типа. В верхнем бейните карбидные частицы расположены между пластинами феррита или по границам и внутри пластин, а в нижнем бейните карбидные частицы одной кристаллографической ориентировки находятся только внутри пластин  $\alpha$ -фазы.

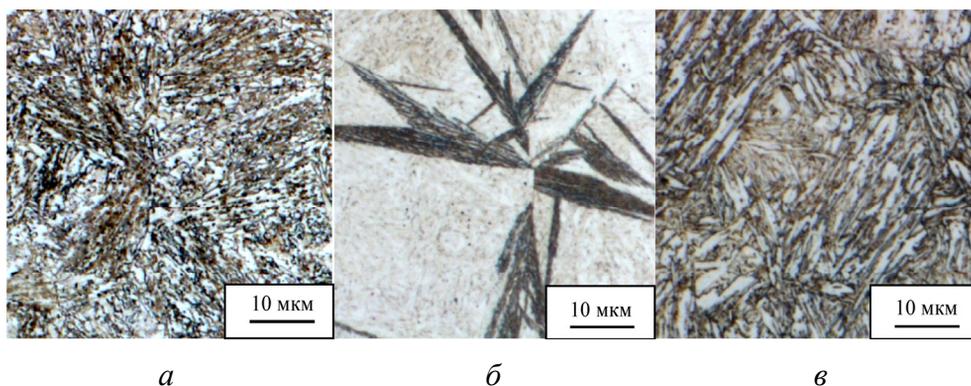


Рис. 1. Микроструктура различных морфологических типов бейнита: *а* – верхний бейнит; *б* – нижний игольчатый бейнит; *в* – нижний речной бейнит ( $\times 1000$ )

### **Игольчатый феррит, или бескарбидный бейнит**

В настоящее время кроме названия «бейнит», используют термин «бескарбидный бейнит» (БКБ). Такой бейнит отличается от классического тем, что в рейках бейнитного феррита и по его границам практически полностью отсутствуют цементитные частицы [8]. Бескарбидный бейнит еще называют игольчатым ферритом, он имеет форму пакета. Бескарбидным может быть не только нижний бейнит, но и верхний. В связи с этим существует классификация Брамфита и Спира, по которой верхний бейнит может иметь еще три морфологии [9].

Термин «бескарбидный бейнит» распространен не только в отечественной, но и в зарубежной литературе [15–17]. Получением и исследованием структуры бескарбидного бейнита занимаются в России (Пермь – доктор технических наук, профессор ПНИПУ Ю.Н. Симонов с сотрудниками, Екатеринбург – академик РАН В.М. Счастливцев и кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института физики металлов УРО РАН А.Ю. Калетин с сотрудниками), Испании, Индии, Китае и других странах [4–5, 15–17]. Получение игольчатого феррита возможно в сталях и сплавах с различным содержанием углерода и легирующих элементов [3, 14, 18, 19]. Комплексное легирование стали определенными химическими элементами позволяет практически полностью подавить процессы образования карбидов в бейнитном феррите. Известно, что наличие в структуре мелкодисперсного бейнитного феррита без выделения карбидов цементитного типа в сочетании со стабильным остаточным аустенитом обеспечивает получение высокого комплекса прочности и вязкости конструкционных сталей [20–22].

Основными легирующими элементами для подавления выделения цементитных частиц являются кремний и алюминий [21, 23–25]. Кроме кремния и алюминия, которые являются недефицитными элементами [27], добавляют иногда кобальт и никель [3, 26], но эти элементы относятся к особо дефицитным [27]. Также в сталь добавляют молибден, ниобий, хром, марганец, ванадий, которые позволяют повысить устойчивость переохлажденного аустенита [14, 28, 29]. Соответственно, конечная структура стали будет содержать большее количество аустенита, который должен быть обогащен углеродом, чем бейнитный феррит [21, 23, 28]. Перечисленные выше легирующие элементы смещают интервал промежуточного превращения в сторону более низких температур. При достаточном содержании легирующих элементов в стали интервалы диффузионного и промежуточного превращений разделяются по температурной шкале [7].

Бескарбидным может быть как нижний, так и верхний бейнит. Наиболее перспективной структурой является нижний бескарбидный бейнит (НБКБ) [3, 14, 30]. Считается, что верхний бейнит является неблагоприятной и нежелательной структурой по сравнению с нижним бейнитом. Верхний бейнит имеет более грубое строение, что отрицательно сказывается на свойствах сталей [30], а нижний бейнит благоприятно влияет на механические характеристики.

Из литературных источников известно, что в последнее время ученые стремятся получать структуру НБКБ в заготовках достаточно большого сечения – до 50–100 мм [3, 4]. Экспериментально выявлено, что первым необходимым условием формирования структуры нижнего бескарбидного бейнита при непрерывном замедленном охлаждении заготовок и деталей достаточно большого сечения является обеспечение высокой устойчивости переохлажденного аустенита в области перлитного превращения [14].

Второе условие получения НБКБ – высокая устойчивость аустенита в бейнитной области. Здесь необходимо сделать ряд уточнений:

1. Для получения структуры НБКБ в широком диапазоне скоростей охлаждения устойчивость аустенита в бейнитной области должна быть хоть и высокой, но ниже, чем в перлитной области. Другими словами, перлитная область не должна закрывать область бейнитного превращения или интенсивность превращения в области перлитного превращения должна быть такой низкой, чтобы доля образующихся избыточных структурных составляющих (феррита и/или перлита) была пренебрежимо мала.

2. Границей между областями существования верхнего и нижнего бейнита большинство исследователей считают интервал 350–450 °С, а средней температурной границей – 400 °С [7, 31–33]. В связи с этим температура начала бейнитного превращения не должна превышать 400 °С, чтобы гарантировать получение именно НБКБ.

В работе [14] приведен пример структуры нижнего и верхнего бескарбидного бейнита. Структура НБКБ (рис. 2, *а*) представляет собой чередующиеся пластины бейнитного феррита и остаточного аустенита, собранные в пакеты. По морфологии верхний бескарбидный бейнит (ВБКБ) (рис. 2, *б*) существенным образом отличается от НБКБ: для ВБКБ характерны области неправильной формы с угловатыми границами.

На рис. 2, *в*, *г*, приведена структура НБКБ, исследованная при помощи трансмиссионного электронного микроскопа (ТЭМ) [14]. Эти результаты полностью подтверждают данные рис. 2, *а*, кроме того, можно сказать, что поперечный размер пластин феррита составляет 200–800 нм, а остаточного аустенита 50–150 нм.

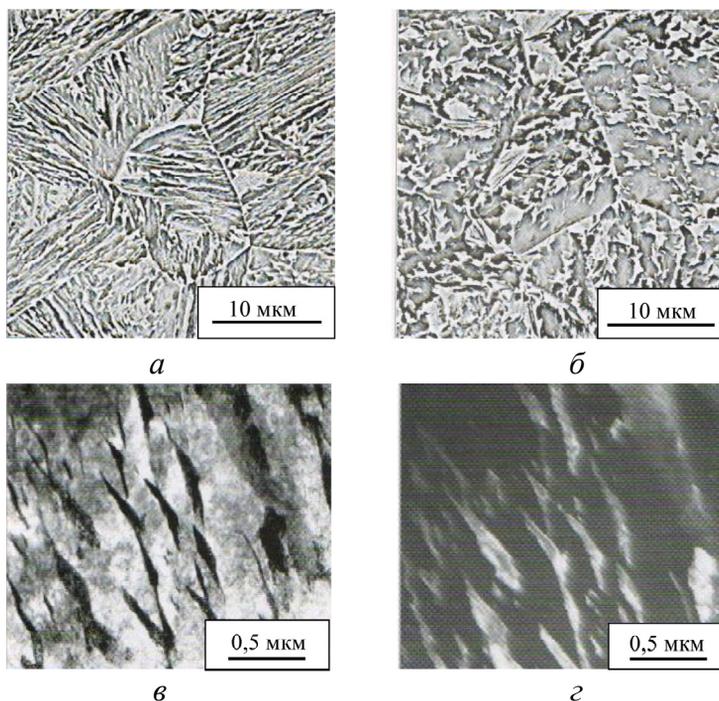


Рис. 2. Микроструктура НБКБ (а, в, г) и ВБКБ (б) в стали 25ХНЗМФС; сканирующая электронная микроскопия (а, б) и ТЭМ (в, г) изображения; в – светлое поле, г – темное поле в рефлексе [200]

### **Термическая обработка на бескарбидный бейнит**

Термическую обработку на бескарбидный бейнит проводят на двух типах оборудования: в печах-ваннах [34, 35] и традиционных термических печах с окислительной атмосферой [3, 14, 30]. Использование печей-ванн дает преимущество, так как в них осуществляется равномерный нагрев и охлаждение до температур изотермической выдержки. Печи с окислительной атмосферой более просты в использовании и не требуют дополнительного обслуживания, поэтому процесс термической обработки становится более простым и относительно дешевым.

Как отмечалось ранее, для того чтобы получить бескарбидный бейнит, нужно специальное легирование. Легирование позволяет повысить устойчивость аустенита, а также сдвинуть область нормального превращения вправо, чтобы избежать получения в структуре избыточных фаз – перлита и феррита. На основании этого, обращаясь к литературным источникам [3, 14], необходимо отметить, что получение бес-

карбидного бейнита возможно в результате непрерывного охлаждения на воздухе и с печью с температуры аустенитизации ( $T_{\text{ауст}}$ ) (рис. 3, а). Также авторы работы [19] показывают возможность получения БКБ-структуры при охлаждении с печью сталей с различным химическим составом. К тому же в статье показана тенденция увеличения доли остаточного аустенита при добавлении в сталь большего количества алюминия с одними параметрами охлаждения. Тем самым доказана возможность получения структуры БКБ при непрерывном охлаждении с печью.

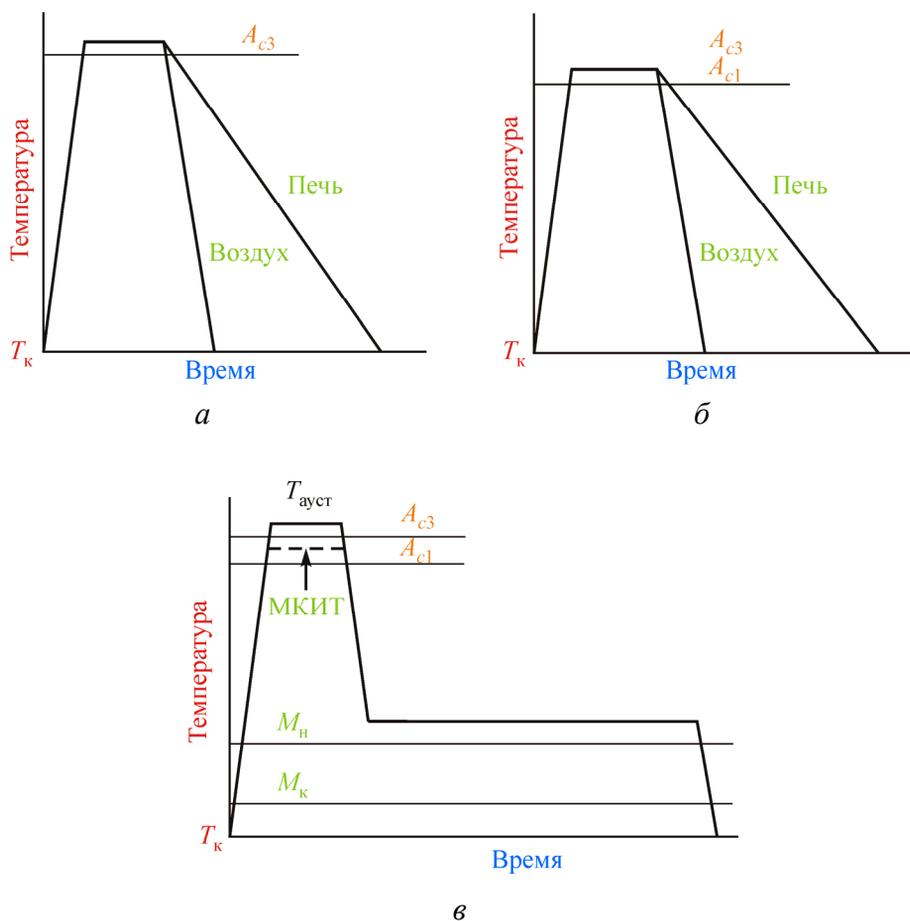


Рис. 3. Схематическое изображение режимов термической обработки с непрерывным охлаждением с  $T_{\text{ауст}}$  (а) и из МКИТ (б) и изотермической закалкой с  $T_{\text{ауст}}$  и из МКИТ (в)

Интерес также вызывает следующий режим термической обработки: непрерывное охлаждение на воздухе и с печью из межкритического интервала температур (МКИТ) (рис. 3, б) [25, 36]. Такая термическая обработка практически не встречается в отечественной литературе, но в зарубежной это нередкий случай, особенно для дилатометрических исследований [25, 36]. Наряду с бейнитом, в структуре сохраняется некоторое количество равномерно распределенной ферритной составляющей. Совокупность БКБ, феррита и достаточного количества остаточного аустенита может благоприятно влиять на характеристики трещиностойкости [37].

Классическим вариантом термической обработки на структуру БКБ является изотермическая закалка [3]. Правильный подход к назначению температуры изотермической выдержки является следующим: проведение дилатометрических исследований, построение изотермических диаграмм, нахождение температуры начала бейнитного превращения, а затем проведение опытных режимов. Такому принципу следуют в каждой стране, которая занимается разработкой новых сталей для получения необходимой структуры.

Итак, изотермическая закалка может проводиться с  $T_{\text{ауст}}$  и из МКИТ (рис. 3, в). Температуру изотермической выдержки (ИЗО) стараются назначить таким образом, чтобы при этой температуре превращение аустенита в нижний бейнит прошло наиболее полно.

Дилатометрические исследования являются важным компонентом в экспериментальном процессе. Результаты дилатометрических исследований позволяют найти все критические точки, при которых происходят фазовые превращения, чтобы назначить опытные режимы и не попасть в область верхнего бейнита, а получить только нижний бескарбидный бейнит [24, 14]. Изотермическая закалка из МКИТ, как и непрерывное охлаждение из МКИТ, приводит к образованию смешанной феррито-бейнитной структуры [25].

Кроме температуры ИЗО важным параметром при такой обработке (см. рис. 3, в) является время выдержки при температуре ИЗО [3]. Это время влияет на полноту превращения аустенита в бейнит. Может быть так, что в процессе длительной выдержки, когда уже превращение закончилось, происходит выделение карбидов, что крайне отрицательно сказывается на устойчивости бейнитного аустенита и, как следствие, на уровне характеристик механических свойств. На длительность

выдержки может повлиять устойчивость аустенита. Если аустенит недостаточно стабилен, то может произойти практически полное превращение аустенита в бейнит в процессе небольших выдержек. Если стабильность аустенита высокая, то превращение может происходить длительное время и существенная часть так и не превратится в бейнит, но может превратиться в высокоуглеродистый пластинчатый мартенсит при окончательном охлаждении до комнатной температуры.

### **Получение смешанной бейнито-мартенситной структуры**

В последнее десятилетие перспективной считают термическую обработку, в результате которой происходит образование бейнито-мартенситной структуры. Такую термическую обработку в зарубежных источниках называют Quenching and Partitioning (Q&P) [26, 35, 37–42]. Получением смешанной структуры занимаются не только за рубежом, но и в России [35, 42]. В целом суть процесса следующая: нужно, чтобы в результате закалки образовался мартенсит, а в процессе выдержки прошло промежуточное превращение. На рис. 4 изображены схемы возможных режимов Q&P-обработки. Более точное объяснение схем *a* и *б* при закалке с температуры аустенитизации на рис. 4 можно представить с помощью данных работы [42]. В этой статье полностью описан процесс Q&P-обработки.

Стоит выделить основные положения, которыми необходимо руководствоваться при выполнении термической Q&P-обработки: 1) закалку проводят таким образом, чтобы происходило только образование мартенсита; 2) охлаждение проводят до температуры подстуживания  $T_p$ , которая регламентирует объемные доли мартенсита и бейнита, образующихся в структуре; 3) изменение температуры нагрева в области изотермического распада позволяет получать бейнит различной морфологии и изменять степень отпуска пересыщенного твердого раствора; 4) время изотермической выдержки выбирается таким образом, чтобы полностью происходили процессы распада переохлажденного аустенита и отпуска полученного ранее мартенсита.

Исследования по определению оптимального соотношения в смешанной структуре мартенситной и бейнитной фаз показывают, что увеличение количества бейнита приводит к уменьшению характеристик прочности и твердости с одновременным увеличением характе-

ристик трещиностойкости [40]. Если в стали сохраняется до 60 % бейнитной составляющей, то по показателям трещиностойкости такая сталь незначительно уступает стали с полностью бейнитной структурой. При этом в структуре стали сохраняется мартенситный каркас, обеспечивающий высокие прочностные характеристики. Большое влияние на механические свойства сталей оказывает морфология бейнита. Структура нижнего бейнита обладает значительным сопротивлением усталостному разрушению. Если в стали образуется структура верхнего бейнита с грубыми выделениями карбидной фазы, то сопротивление распространению трещин значительно снижается.

Как обсуждалось ранее, если закалку проводить из МКИТ (см. рис. 4), то происходит выделение ферритной избыточной фазы, которая вносит свой вклад в уровень свойств стали [37].

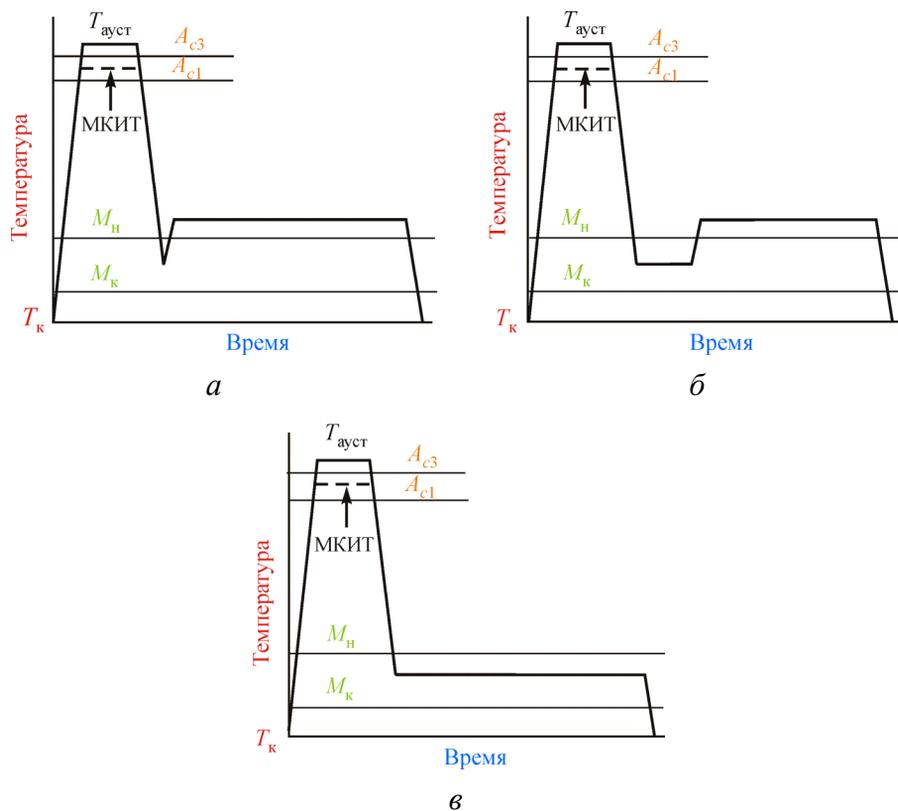


Рис. 4. Схематическое изображение режимов термической Q&P-обработки: *а* – изотермическая закалка с подстуживанием; *б* – изотермическая закалка с некоторой выдержкой в мартенситном интервале; *в* – изотермическая закалка ниже температуры начала мартенситного превращения

Также хочется отметить, что для поддержания нужной температуры в интервале мартенситного превращения используются селитровые ванны [35]. Если не использовать в этом случае печи-ванны, то процесс контроля температуры становится затруднительным.

Отдельно можно выделить режимы (рис. 4, в), которые встречаются в литературе реже и распространены меньше, чем остальные, но такие способы обработки являются также перспективными, так как можно получать структуру, состоящую из бейнита, мартенсита и остаточного аустенита с определенным процентным соотношением [24]. Единственным условием является проведение дилатометрических исследований для определения конкретного процентного соотношения.

Чтобы получить бейнит, нужна обычно длительная выдержка, но всё зависит от химического состава стали и бейнитного интервала температур. Чаще всего минимальная устойчивость переохлажденного аустенита (так называемый «нос» С-образной кривой бейнитного образования на диаграммах превращения переохлажденного аустенита) находится выше  $M_n$  [3, 42].

### Свойства структуры, содержащей бейнит или БКБ

Как отмечалось выше, для повышенных свойств структуры БКБ необходимо достаточное количество остаточного аустенита ( $A_{ост}$ ). С увеличением  $A_{ост}$  происходит повышение вязкости стали, как это показано в табл. 1. Прочностные характеристики остаются практически на одном уровне.

Механические свойства приведены в других статьях [15, 16, 43], а также в табл. 2.

Таблица 1

Механические свойства и содержание аустенита в сталях с различным химическим составом после непрерывного охлаждения со скоростью 5 °С/мин [19]

Сталь	$\sigma_B$ , МПа	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>	Твердость НРС	$A_{ост}$ , %
40Х2Н2МА	1110	0,3	36	6
15Х2Н3МФ	1150	1,33	37	14
14Х2Н2ГМФ	1090	1,25	36	15
10Х2Н3ГМ	1240	1,10	38	9
40Х2Н2МЮ	1220	1,00	38	24

Таблица 2

Механические свойства стали 29Х2Г2С2МФ  
после различных режимов обработки [30]

Режим обработки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	KCV, Дж/см <sup>2</sup>	KCU, Дж/см <sup>2</sup>	HRC
$T_{\text{ауст}} = 880$ °С, охлаждение на воздухе	1420	1793	15	44	38	82	45
$T_{\text{ауст}} = 880$ °С, охлаждение с печью	1088	1477	14,5	41,5	41	93	40
$T_{\text{ауст}} = 820$ °С, охлаждение на воздухе	950	1353	15	43	49	72	39
$T_{\text{ауст}} = 820$ °С, охлаждение с печью	823	1166	16,5	37,5	49	100	27
$T_{\text{ауст}} = 880$ °С, $T_{\text{ИЗО}} = 275$ °С (360 мин)	1310	1654	13,5	50,5	53	94	45
$T_{\text{ауст}} = 820$ °С, $T_{\text{ИЗО}} = 275$ °С (360 мин)	915	1197	19	51,5	75	114	35

*Примечание.* Перед аустенитизацией проводился отпуск при  $T = 660$  °С с выдержкой 180 мин и охлаждением на воздухе; при аустенитизации время выдержки 60 мин; после каждого режима для каждой плавки был проведен отпуск при  $T = 200$  °С с выдержкой 120 мин и охлаждением на воздухе.

В этом примере наглядно показано влияние легирующих элементов на свойства. При добавлении в сталь 40Х2Н2МА алюминия резко повышается ударная вязкость. К максимальной ударной вязкости среди представленных сталей приводит наличие никеля в стали 15Х2Н3МФ.

Сталь 29Х2Г2С2МФ относится к высокопрочным сталям, поэтому предел прочности может получаться выше 1600 МПа. В статье [30] предполагается, что после изотермической закалки ( $T_{\text{ауст}} = 880$  °С,  $T_{\text{ИЗО}} = 275$  °С (360 мин)) получается структура нижнего бескарбидного бейнита с пакетным мартенситом, которая позволяет реализовать высокие прочностные характеристики при повышении показателей надежности по сравнению с непрерывным охлаждением на воздухе. Обработка из МКИТ приводит к закономерному понижению прочности и повышению пластичности, ударных характеристик.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

Анализ литературных источников показал, что тема бескарбидного бейнита актуальна и вызывает интерес исследователей разных стран. Бейнитный феррит без выделения карбидов в стали с определенным сочетанием углерода и кремния позволяет повысить прочностные характеристики или показатели трещиностойкости, а зачастую общий уровень механических свойств, что влияет на продолжительность работы различных деталей машиностроения.

Определенное соотношение легирующих элементов в стали позволяет полностью избежать при непрерывном охлаждении попадания в область нормального превращения, тем самым повышается устойчивость аустенита и превращение начинается уже в бейнит.

В результате анализа отечественной и зарубежной литературы отмечается, что в последние годы возрастает тенденция к проведению термической Q&P-обработки. Другие режимы термической обработки также остаются популярными и применяются при научных исследованиях. Q&P-обработка является перспективным термическим процессом, так как достигнуть высоких механических свойств можно не только с помощью одной структуры БКБ, но и при получении смешанной бейнито-мартенситной структуры.

Актуальной задачей остается получение именно нижнего бескарбидного бейнита, так как верхний бейнит по своей морфологии является грубой структурой, что понижает свойства стали.

Практически неизученной является структура, которая получается после термической обработки из межкритического интервала температур, так как в литературе о ней встречается значительно меньше данных, чем о структуре, полученной после термической обработки с температуры аустенитизации.

Изученные литературные данные подтвердили предположения о том, что необходимо упрощать технологию получения структуры БКБ, так как на данный момент это достаточно точный процесс термической обработки, который необходимо тщательно соблюдать. Также перспективным считается использование традиционного печного оборудования, по сравнению с печами-ваннами, так как это упрощает технологию термической обработки.

Необходимо отметить, что нижний бескарбидный бейнит стремятся получать в сечениях 50–100 мм. Это позволяет расширить номенклатуру деталей со структурой БКБ.

### Список литературы

1. Курдюмов Г.В., Утевский Л.М., Энтин Р.И.М. Превращения в железе и стали. – Наука, 1977. – 236 с.
2. Davenport E., Bain E. // Trans. AIME. – 1930. – Vol. 90, № 1. – P. 117–154.
3. Получение структуры нижнего бескарбидного бейнита в результате изотермической обработки сталей типа ХЗГЗМФС и ХНЗМФС / Ю.Н. Симонов, М.Ю. Симонов, Д.О. Панов, В.П. Вылежнев, А.Ю. Калетин // МиТОМ. – 2016. – № 2. – С. 4–13.
4. Goulas C., Mecozzi M.G., Sietsma J. Bainite formation in medium-carbon low-silicon spring steels accounting for chemical segregation // Metallurgical and Materials Transactions. – 2016. – Vol. 47A. – P. 3077–3087.
5. Fast granularization of lath-like bainite in FeNiC alloys during isothermal holding at  $M_s + 20$  K ( $+20$  °C) / М.В.Н. Slama, N. Gey, L. Germain, J.C. Hell, K. Zhu, S. Allain // Metallurgical and Materials Transactions. – 2016. – Vol. 47A. – P. 15–18.
6. Гуляев А.П. Металловедение: учебник для вузов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Metallurgiya, 1986. – 544 с.
7. Смирнов М.А., Счастливец В.М., Журавлев Л.Г. Основы термической обработки стали: учеб. пособие. – Екатеринбург, 1999. – 496 с.
8. Счастливец В.М., Калетина Ю.В., Фокина Е.А. Остаточный аустенит в легированных сталях. – Екатеринбург: Изд-во Уро РАН, 2014. – 236 с.
9. Большаков В.И. Игольчатый феррит // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – № 9. – P. 10–15.
10. Reynolds W.T., Aaronson H.I., Spanos G. A. Summary of the present diffusionist views on bainite // Materials Transaction. – 1991. – Vol. 32, № 8. – P. 737–743.
11. Bramfitt B.L., Speer J.G. A perspective morphology of bainite // Metallurgical Transactions A. – 1990. – Vol. 21, iss. 3. – P. 817–826.
12. Morphology and properties of low-carbon bainite / H. Ohtani, S. Okaguchi, Y. Fujishiro, Y. Ohmori // Metallurgical Transactions A. – 1990. – Vol. 21, iss. 3. – P. 877–888.

13. Свищенко В.В., Чепрасов Д.П., Иванайский А.А. Формирование в промежуточной области структур зернистой морфологии и некоторые вопросы терминологии // Ползуновский альманах. – 2003. – № 4. – С. 111–114.

14. Принципы конструирования химического состава сталей для получения структуры нижнего бескарбидного бейнита при замедленном охлаждении / Ю.Н. Симонов, Д.О. Панов, М.Ю. Симонов, В.П. Вылежнев, А.С. Иванов // МиТОМ. – 2015. – № 7. – 20–28.

15. Khare S., Lee K., Bhadeshia H.K.D.H. Carbide-free Bainite: compromise between rate of transformation and properties // Metallurgical and Materials Transactions. – 2010. – Vol. 41A. – P. 922–928.

16. Sharma S., Sangal S., Mondial K. Development of new high-strength carbide-free bainite steels // Metallurgical and Materials Transactions. – 2011. – Vol. 42A. – P. 3921–3933.

17. Yakubtsov I.A., Purdy G.R. Analyses of transformation kinetics of carbide-free bainite above and below the athermal martensite-start temperature // Metallurgical and Materials Transactions. – 2012. – Vol. 43A. – P. 437–446.

18. Формирование структуры и свойств бескарбидного бейнита в стали 30ХГСА / Д.О. Панов, Ю.Н. Симонов, П.А. Леонтьев, Ю.А. Калетин, М.Н. Георгиев // МиТОМ. – 2016. – № 2. – С. 13–18.

19. 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.

20. Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H. Very strong bainite // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2004. – № 8. – P. 251–257.

21. 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.

22. 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.

23. Калетин Ю.М., Рыжков А.Г., Калетин А.Ю. Легирование и термическая обработка сталей с бейнитной структурой // МиТОМ. – 1987. – № 10. – С. 13–16.

24. Navarro-Lopez A., Sietsma J., Santofimia M.J. Effect of prior athermal martensite on the isothermal transformation kinetics below Ms in a low-C High-Si steel // Metallurgical and Materials Transactions. – 2016. – Vol. 47A. – P. 1028–1039.

25. Yi H.L., Chen P., Bhadeshia H.K.D.H. Optimizing the morphology and stability of retained austenite in a  $\delta$ -TRIP steel // Metallurgical and Materials Transactions. – 2014. – Vol. 45A. – P. 3512–3518.

26. Development of multiphase microstructure with bainite, martensite and retained austenite in a co-containing steel through quenching and partitioning (Q&P) treatment / S. Santigopal, D. Sourav, Ch. Debalay, S. Indradev, S. Shiv Brat, H. Arunansu // Metallurgical and Materials Transactions. – 2013. – Vol. 44A. – P. 5653–5664.

27. Ковалева А.А. Специальные стали и сплавы [Электронный ресурс]: электрон. учеб.-метод. комплекс дисциплины. – Красноярск: Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2007. – 211 с. – URL: [http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/71/u\\_lectures.pdf](http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/71/u_lectures.pdf) (дата обращения: 16.02.2016).

28. Калетин А.Ю., Калетина Ю.В. Повышение вязкости конструкционных сталей при образовании бескарбидного бейнита // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение и материаловедение. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 22–30.

29. On the low temperature strain aging of bainite in the TRIP steel / I. Timokhina, H. Beladi, X.-Y. Xiong, P.D. Hodgson // Metallurgical and Materials Transactions. – 2013. – Vol. 44A. – P. 5177–5191.

30. Юрченко А.Н., Симонов Ю.Н., Микрюков М.Ю. Влияние непрерывного охлаждения и изотермической выдержки на микроструктуру и механические свойства сталей 17X2Г2С2МФ и 29X2Г2С2МФ // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение и материаловедение. – 2016. – Т. 18, № 1. – С. 101–116.

31. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 359 с.

32. Новиков И.И. Теория термической обработки. – М.: Металлургия, 1986. – 480 с.

33. Гольдштейн М.И., Грачев С.И., Векслер Ю.Г. Специальные стали: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.

34. Sharma S., Sangal S., Mondial K. Reciprocating slitting wear behavior of newly developed bainitic steels // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2014. – Vol. 45A. – P. 5451–5468.

35. Попелюх П.А., Попелюх А.И., Юркевич М.Р. Комбинированная термомеханическая обработка стали с мартенсито-бейнитным превращением аустенита // *Обработка металлов*. – 2013. – № 2(59). – С. 62–68.

36. Mohanty R.R., Girina O.A., Fonstein N.M. Effect of heating rate on the austenite formation in low-carbon high-strength steels annealed in the intercritical region // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2011. – Vol. 42A. – P. 3680–3690.

37. Effect of direct quenching and partitioning treatment on mechanical properties of a hot rolled strip steel / Kang Jian, Wang Chao, Li Yunjie, Yuan Guo, Wang Guodong // *Journal of Wuhan University of Technology. Mater. Sci. Ed.* – 2016. – Vol. 31, № 1. – P. 178–185.

38. Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: an overview / D.K. Matlock, J.G. Speer, E.De Moor, P.J. Gibbs // *Jestech*. – 2012. – № 15(1). – P. 1–12.

39. Santofimia M.J., Zhao L., Sietsma J. Microstructural evolution of a low-carbon steel during application of quenching and partitioning heat treatments after partial austenitization // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2009. – Vol. 40A. – P. 46–57.

40. Santofimia M.J., Zhao L., Sietsma J. Overview of mechanisms involved during the quenching and partitioning process in steels // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2011. – Vol. 42A. – P. 3620–3626.

41. Seo E.J., Cho L., De Cooman B.C. Application of quenching and partitioning (Q&P) processing to press hardening steel // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2014. – Vol. 45A. – P. 4022–4037.

42. Повышение конструкционной прочности деталей ударных машин термической обработкой с созданием в стали смешанной структуры / А.И. Попелюх, А.М. Теплых, Д.С. Терентьев, А.Ю. Огнев // *Обработка металлов*. – 2009. – № 2(43). – С. 19–24.

43. Effects of cooling conditions on microstructure, tensile properties, and charpy impact toughness of low-carbon high-strength bainitic steels / Hyo Kyung Sung, Sang Yong Shin, Byoungchul Hwang, Chang Gil Lee, Sunghak Lee // *Metallurgical and Materials Transactions*. – 2013. – Vol. 44A. – P. 294–302.

## References

1. Kurdiumov G.V., Utevskaia L.M., Entin R.I.M. *Prevrashcheniia v zheleze i stali* [Transformations in the iron and steel]. Moscow: Nauka, 1977. 236 p.
2. Davenport E., Bain E. *Trans. AIME*, 1930, vol. 90, no. 1, pp. 117-154.
3. Simonov Iu.N., Simonov M.Iu., Panov D.O., Vylezhnev V.P., Kaletin A.Iu. Poluchenie struktury nizhnego beskarbidnogo beinita v rezul'tate izotermicheskoi obrabotki stali tipa Kh3G3MFS i KhN3MFS [Getting the structure of the lower bainite beskarbidnogo a result of isothermal treatment type and H3G3MFS HN3MFS steels]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 2016, no. 2, pp. 4-13.
4. Goulas C., Mecozzi M.G., Sietsma J. Bainite formation in medium-carbon low-silicon spring steels accounting for chemical segregation. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2016, vol. 47A, pp. 3077-3087.
5. Slama M.B.H., Gey N., Germain L., Hell J.C., Zhu K., Allain S. Fast granularization of lath-like bainite in FeNiC alloys during iso-thermal holding at Ms+ 20 K (+20 °C). *Metallurgical and Materials Transactions*, 2016, vol. 47A, pp. 15-18.
6. Guliaev A.P. *Metallovedenie* [Metallurgy]. Moscow: Metallurgiiia, 1986. 544 p.
7. Smirnov M.A., Schastlivtsev V.M., Zhuravlev L.G. *Osnovy termicheskoi obrabotki stali* [Fundamentals of heat treatment of steel]. Ekaterinburg, 1999. 496 p.
8. Schastlivtsev V.M., Kaletina Iu.V., Fokina E.A. *Ostatochnyi austenit v legirovannykh staliakh* [The residual austenite in the alloy steel]. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademi nauk, 2014. 236 p.
9. Bol'shakov V.I. Igol'chatyi ferrit [Needle ferrite]. *Bicnik Pridni-provs'koi derzhavnoi akademii budivnitstva ta arkhitekturi*, 2015, no. 9, pp. 10-15.
10. Reynolds W.T., Aaronson H.I., Spanos G.A. Summary of the present diffusionist views on bainite. *Materials Transaction*, 1991, vol. 32, no. 8, pp. 737-743.
11. Bramfitt B.L., Speer J.G. A perspective morphology of bainite. *Metallurgical Transactions A*, 1990, vol. 21, iss. 3, pp. 817-826.

12. Ohtani H., Okaguchi S., Fujishiro Y., Ohmori Y. Morphology and properties of low-carbon bainite. *Metallurgical Transactions A*, 1990, vol. 21, iss. 3, pp. 877-888.

13. Svishchenko V.V., Cheprasov D.P., Ivanaiskii A.A. Formirovanie v promezhutochnoi oblasti struktur zernistoi morfologii i nekotorye voprosy terminologii [Formation in the intermediate structures of grain morphology and some questions of terminology]. *Polzunovskii al'manakh*, 2003, no. 4, pp. 111-114.

14. Simonov Iu.N., Panov D.O., Simonov M.Iu., Vylezhnev V.P., Ivanov A.S. Printsipy konstruirovaniia khimicheskogo sostava stalei dlia poluchenii struktury nizhnego beskarbidnogo beinita pri zamedlennom okhlazhdenii [Principles of designing the chemical composition of steel for the structure of the lower bainite beskarbidnogo during slow cooling]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 2015, no. 7, pp. 20-28.

15. Khare S., Lee K., Bhadeshia H.K.D.H. Carbide-free Bainite: compromise between rate of transformation and properties. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2010, vol. 41A, pp. 922-928.

16. Sharma S., Sangal S., Mondial K. Development of new high-strength carbide-free bainite steels. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2011, vol. 42A, pp. 3921-3933.

17. Yakubtsov I.A., Purdy G.R. Analyses of transformation kinetics of carbide-free bainite above and below the athermal martensite-start temperature. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2012, vol. 43A, pp. 437-446.

18. Panov D.O., Simonov Iu.N., Leont'ev P.A., Kaletin Iu.A., Georgiev M.N. Formirovanie struktury i svoistv beskarbidnogo beinita v stali 30KhGSA [Formation of the structure and properties of the steel beskarbidnogo bainite 30KhGSA]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 2016, no. 2, pp. 13-18.

19. Kaletin A.Iu., Ryzhkov A.G., Kaletina Iu.V. Povyshenie udarnoi viazkosti konstruktsionnykh stalei pri obrazovanii beskarbidnogo beinita [Increased toughness of structural steels in the formation of bainite beskarbidnogo]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 2015, vol. 116, no. 1, pp. 114-120.

20. Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H. Very strong bainite. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2004, no. 8, pp. 251-257.

21. Kaletin Iu.M., Ryzhkov A.G., Kaletin A.Iu. Vliianie kremniia i aliuminiia na svoistva konstruktsionnykh khromonikelevykh stalei s beinit-

noi strukturoi [Influence of silicon and aluminum on the structural properties of chromium-nickel steels with bainitic]. *Izvestiia vuzov. Chernaia metallurgii*, 1989, no. 6, pp. 96-99.

22. Georgiev M.N., Kaletin A.Iu., Simonov Iu.N., Schastlivtsev V.M. Vliianie stabil'nosti ostatochnogo austenita na treshchinostoikost' konstruktsionnoi stali [Influence of retained austenite stability at fracture of structural steel]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1990, no. 1, pp. 113-121.

23. Kaletin Iu.M., Ryzhkov A.G., Kaletin A.Iu. Legirovanie i termicheskaiia obrabotka stalei s beinitnoi strukturoi [The alloying and heat treatment of steels with bainitic]. *Metallovedenie i termicheskaiia obrabotka metallov*, 1987, no. 10, pp. 13-16.

24. Navarro-Lopez A., Sietsma J., Santofimia M.J. Effect of prior athermal martensite on the isothermal transformation kinetics below Ms in a low-C High-Si steel. *Metallurgical and materials transactions*, 2016, vol. 47A, pp. 1028-1039.

25. Yi H.L., Chen P., Bhadeshia H.K.D.H. Optimizing the morfology and stability of retained austenite in a  $\delta$ -TRIP steel. *Metallurgical and materials transactions*, 2014, vol. 45A, pp. 3512-3518.

26. Santigopal S., Sourav D., Debalay C., Indradev S., Shiv Brat S., Arunansu H. Development of multiphase microstructure with bainite, martensite and retained austenite in a co-containing steel through quenching and parti-tioning (Q&P) treatment. *Metallurgical and materials transactions*, 2013, vol. 44A, pp. 5653-5664.

27. Kovaleva A.A. Spetsial'nye stali i splavy [Special steels and alloys]. Krasnoiarsk: Sibirskii federal'nyi universitet, 2007. 211 p., available at: [http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/71/u\\_lectures.pdf](http://files.lib.sfu-kras.ru/ebibl/umkd/71/u_lectures.pdf) (accessed 16 February 2016).

28. Kaletin A.Iu., Kaletina Iu.V. Povyslenie viazkosti konstruktsionnykh stalei pri obrazovanii beskarbidnogo beinita [Increasing the viscosity of the structural steel in the formation of bainite beskarbidnogo]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie i materialovedenie*, 2014, vol. 16, no. 4, pp. 22-30.

29. Timokhina I., Beladi H., Xiong X.-Y., Hodgson P.D. On the low temperature strain aging of bainite in the TRIP steel. *Metallurgical and materials transactions*, 2013, vol. 44A, pp. 5177-5191.

30. Iurchenko A.N., Simonov Iu.N., Mikriukov M.Iu. Vliianie nepreryvnogo okhlazhdeniia i izotermicheskoi vyderzhki na mikrostrukturu i

mekhanicheskie svoistva stali 17Kh2G2S2MF i 29Kh2G2S2MF [Effect of continuous cooling and isothermal holding on microstructure and mechanical properties of steels 17H2G2S2MF and 29H2G2S2MF]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie i materialovedenie*, 2016, vol. 18, no. 1, pp. 101-116.

31. Lakhtin Iu.M. Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov [Metallurgy and heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 359 p.

32. Novikov I.I. Teoriia termicheskoi obrabotki [The theory of heat treatment]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 480 p.

33. Gol'dshtein M.I., Grachev S.I., Veksler Iu.G. Spetsial'nye stali [Special steel]. Moscow: Metallurgiya, 1985. 408 p.

34. Sharma S., Sangal S., Mondial K. Reciprocating slitting wear behavior of newly developed bainitic steels. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2014, vol. 45A, pp. 5451-5468.

35. Popeliukh P.A., Popeliukh A.I., Iurkevich M.R. Kombinirovanaiia termomekhanicheskaia obrabotka stali s martensito-beinitnym prevrashcheniem austenita [Combined thermomechanical treatment of steel with martensite-bainite transformation of austenite]. *Obrabotka metallov*, 2013, no. 2(59), pp. 62-68.

36. Mohanty R.R., Girina O.A., Fonstein N.M. Effect of heating rate on the austenite formation in low-carbon high-strength steels annealed in the in-tercritical region. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2011, vol. 42A, pp. 3680-3690.

37. Kang Jian, Wang Chao, Li Yunjie, Yuan Guo, Wang Guodong. Effect of direct quenching and partitioning treatment on mechanical properties of a hot rolled strip steel. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 2016, vol. 31, no. 1, pp. 178-185.

38. Matlock D.K., Speer J.G., De Moor E., Gibbs P.J. Recent developments in advanced high strength sheet steels for auto-motive applications: an overview. *Jestech*, 2012, no. 15(1), pp. 1-12.

39. Santofimia M.J., Zhao L., Sietsma J. Microstructural evolution of a low-carbon steel during application of quenching and partitioning heat treatments after partial austenitization. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2009, vol. 40A, pp. 46-57.

40. Santofimia M.J., Zhao L., Sietsma J. Overview of mechanisms involved during the quenching and partitioning process in steels. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2011, vol. 42A, pp. 3620-3626.

41. Seo E.J., Cho L., De Cooman B.C. Application of quenching and par-titioning (Q&P) processing to press hardening steel. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2014, vol. 45A, pp. 4022-4037.

42. Popeliukh A.I., Teplykh A.M., Terent'ev D.S., Ognev A.Iu. Povyshenie konstruktсионnoi prochnosti detalei udarnykh mashin termicheskoi obrabotkoi s sozdaniem v stali smeshannoi struktury [Increased structural strength of parts by heat treatment machine drum with the creation of a mixed structure of steel]. *Obrabotka metallov*, 2009, no. 2(43), pp. 19-24.

43. Hyo Kyung Sung, Sang Yong Shin, Byoungchul Hwang, Chang Gil Lee, Sunghak Lee. Effects of cooling conditions on microstructure, tensile properties, and charpy impact toughness of low-carbon high-strength bainitic steels. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2013, vol. 44A, pp. 294-302.

Получено 20.06.2016

### **Об авторах**

**Юрченко Александр Николаевич** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sanyaurchenko@rambler.ru.

**Симонов Юрий Николаевич** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: mto@pstu.ru, simonov@pstu.ru.

### **About the authors**

**Alexander N. Yurchenko** (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Metal Science, Laser and Heat Treatment of Metals, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sanyaurchenko@rambler.ru.

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