

Научные тезисы

УДК 669.14.018.29:539.4.015

РАЗРАБОТКА СПОСОБА НЕРАЗРУШАЮЩЕГО  
КОНТРОЛЯ ВЯЗКОСТИ ЗАКАЛЕННЫХ  
НА БЕЙНИТ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

**Андрей Юрьевич Калетин<sup>1</sup>, Юлия Владимировна Калетина<sup>2</sup>,  
Юрий Николаевич Симонов<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup> Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

<sup>1</sup> [akalet@imp.uran.ru](mailto:akalet@imp.uran.ru)

**Аннотация.** В работе выявлена четкая взаимосвязь количества и свойств остаточного аустенита, содержащегося в конструкционных легированных сталях после закалки в бейнитной области температур, с их механическими свойствами, и впервые разработан способ неразрушающего контроля качества применяемой термической обработки и уровня ударной вязкости деталей из этих сталей.

**Ключевые слова:** бейнитное превращение, изотермическая закалка, остаточный аустенит, ударная вязкость

**Финансирование:** исследование выполнено в рамках государственного задания Минобрнауки России (темы «Давление» г.р. № АААА-А18-118020190104-3 и «Структура» г.р. № АААА-А18-118020190116-6) при частичной поддержке РФФИ (проект № 20-03-00056).

Scientific thesises

DEVELOPMENT OF THE NONDESTRUCTIVE TESTING  
METHOD FOR CONTROLLING  
THE TOUGHNESS OF STRUCTURAL STEELS  
AFTER BAINITIC HARDENING

**Andrey Yu. Kaletin<sup>1</sup>, Julia V. Kaletina<sup>2</sup>, Yuriy N. Simonov<sup>3</sup>**

<sup>1,2</sup> M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

<sup>3</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

<sup>1</sup> *akalet@imp.uran.ru*

**Abstract.** The work reveals a clear relationship between the amount and properties of retained austenite contained in structural alloy steels after bainite hardening with mechanical properties, and for the first time the nondestructive quality controlling method for the applied heat treatment and the level of impact toughness of parts has been developed.

**Keywords:** bainitic transformation, austempering, retained austenite, impact hardness

**Funding:** the study was carried out within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of Russia (topics “Pressure”, born in the year no. AAAA18-118020190104-3 and “Structure”, born in the year no. AAAA18-118020190116-6) with partial support of the RFBR (project no. 20-03-00056).

Одним из основных видов термической обработки конструкционных экономнолегированных сталей для получения бейнитной структуры является изотермическая закалка, которая широко используется в машиностроении при крупносерийном производстве таких изделий, как высокопрочные метизы и мелкогабаритные детали ответственного назначения. К механическим свойствам таких изделий предъявляются повышенные требования, в частности, в них должны обеспечиваться сочетание высокой прочности и трещиностойкости. Для обеспечения этих свойств такие детали после высокотемпературной аустенитизации подвергают термической обработке в нижней части изотермического превращения переохлажденного аустенита для получения структуры нижнего бейнита.

Как правило, на предприятиях, выпускающих высокопрочные крепежные изделия ответственного назначения, применяется так называемая светлая изотермическая закалка, которая заключается в нагреве деталей под аустенизацию с последующим быстрым охлаждением в печах-ваннах в расплавах щелочей при температурах промежуточной области несколько выше мартенситной точки для получения структуры бейнита. При этом достигается высокая прочность при достаточном уровне ударной вязкости. Детали в заводских условиях обрабатываются довольно крупными партиями, и контроль качества проведенной термообработки изделий осуществляется выборочно путем испытания

механических свойств (как правило, измеряются твердость и ударная вязкость) образцов — свидетелей из этой же стали, термообработанных в каждой отдельной партии деталей, поскольку невозможно обеспечить полный контроль для каждой детали.

Остаточный аустенит в сталях с бейнитной структурой по содержанию углерода может значительно отличаться от среднего состава стали. Бейнитное превращение протекает во времени, поэтому в среднеуглеродистых экономнолегированных сталях при температурах бейнитного превращения (300–450 °С) образуется двухфазная аустенитно-бейнитная структура, в которой сосуществуют  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фазы. В этом случае может происходить обогащение еще не превратившегося аустенита углеродом [1]. Особенно заметно этот процесс происходит в сталях, легированных элементами, препятствующими образованию карбидов, например, кремнием.

В работе была поставлена задача на основании исследований особенностей структуры и механических свойств сталей после закалки на бейнит разработать метод неразрушающего контроля качества термообработки деталей ответственного назначения из закаленных на бейнит среднеуглеродистых конструкционных сталей и оценки уровня ударной вязкости таких деталей.

Был проведен анализ особенностей структуры бейнита, образующегося при изотермической закалке в зависимости от условий термообработки, который показал, что после закалки в промежуточном интервале температур бейнит в структуре конструкционных сталей может быть как бескарбидным, так и содержать карбидные выделения. При этом остаточный аустенит в бескарбидном бейните существенно обогащен по углероду и содержит значительную часть от общего содержания углерода в стали. Было также исследовано влияние количества и свойств остаточного аустенита на механические свойства бейнитной структуры и обнаружено, что для исследованных сталей доля углерода в остаточном аустените, независимо от его количества, может характеризовать морфологические особенности структурных составляющих фазовых превращений (бескарбидный бейнит или бейнит с карбидами) и уровень ударной вязкости стали. Было установлено, что при содержании в остаточном аустените бескарбидного бейнита более 70–80 % углерода сталь при почти одинаковой прочности обладает уровнем ударной вязкости в 3–4 раза выше, чем сталь с бейнитом, содержащим карбидные выделения.

На основании выявленных закономерностей взаимосвязи свойств остаточного аустенита и сопротивления ударным воздействиям сталей с бейнитной структурой разработан способ неразрушающего контроля уровня ударной вязкости и ресурса эксплуатации изделий из среднеуглеродистых конструкционных сталей, термообработанных методом изотермической закалки в бейнитном интервале температур [2]. Способ заключается в рентгенографическом определении количества углерода в остаточном аустените и вычислении величины доли углерода, содержащегося в остаточном аустените, для контролируемого изделия и получении значения ударной вязкости изделия при сравнении этих данных с кривыми, построенными для образцов-эталонов, подвергнутых изотермической закалке при температурах и выдержках во всем интервале бейнитного превращения. Графики построены в координатах «время изотермической выдержки» — «доля углерода в остаточном аустените (величина ударной вязкости)» для стали, используемой при производстве контролируемых изделий.

Разработанный способ осуществляется полностью неразрушающим методом и позволяет проводить экспресс-контроль качества ответственных изделий из конструкционных легированных сталей, термообработанных методом изотермической закалки в бейнитном интервале температур, подвергающихся при эксплуатации значительным ударным нагрузкам.

Способ позволяет автоматизировать процесс неразрушающего контроля ударной вязкости серийных и крупносерийных изделий ответственного назначения, а также контролировать качество проведенного режима изотермической закалки и ресурс эксплуатации изделий.

#### Список источников

1. Калетин А. Ю., Калетина Ю. В. Роль остаточного аустенита в структуре бескарбидного бейнита конструкционных сталей. Физика металлов и металлография. 2018. Т. 119. № 9. С. 946–952.

2. Способ оценки уровня ударной вязкости изделий из закаленной на бейнит конструкционной стали : пат. 2760634 Рос. Федерация : МПК G01N 23/00; Калетин А. Ю., Калетина Ю. В., Симонов Ю. Н. ; заявитель и патентообладатель Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН. № 2020136284 ; заявл. 03.11.20; опубл. 29.11.21, бюлл. № 34. 12 с.

### References

1. Kaletin A.Yu., Kaletina Yu.V. The Role of Retained Austenite in the Structure of Carbide-Free Bainite of Construction Steels // *Physics of Metals and Metallography*. 2018. V. 119. No. 9. P. 893–898.

2. Method for assessing the impact toughness of bainite-hardened structural steel : Pat. 2760634 Rus. Federation : IPC G01N 23/00; Kaletin A. Yu., Kaletina Yu.V., Simonov Yu.N. ; applicant and patentee of the M.N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. No. 2020136284 ; declared 03.11.20; publ. 11/29/21, Bull. No. 34. 12 p.