

# Разработка способа оценки уровня ударной вязкости изотермически закаленных конструкционных сталей

А.Ю. Калетин, Ю.В. Калетина

Поскольку наша работа посвящена исследованию бейнитной структуры в конструкционных сталях, то уместным будет отметить, что в текущем 2024 году исполняется ровно 90 лет со времени возникновения самого термина «бейнит». Таким термином сотрудники фирмы «United States Steel Corporation» назвали продукт промежуточного превращения переохлажденного аустенита сталей при изотермических выдержках между перлитным и мартенситным превращением в честь руководителя исследовательской лаборатории отдела физической металлургии корпорации выдающегося американского металлурга и металловеда Эдгара Бейна. Доктор Бейн в 1930 году совместно с Е. Давенпортом опубликовал статью под названием «Превращение аустенита при постоянных докритических температурах». С тех пор термин бейнит стал общепринятым, а исследованию этой структуры посвящено большое количество научных работ.

В работе мы исследовали влияние температурно-временных параметров изотермической закалки в интервале бейнитного превращения на термическую устойчивость остаточного аустенита и ее влияние на ударную вязкость экономнолегированных конструкционных сталей. Изотермическая закалка широко используется в машиностроении при крупносерийном производстве высокопрочные метизов и мелкогабаритных деталей 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 детали после высокотемпературной аустенитизации подвергаются термической обработке в нижней части изотермического превращения переохлажденного аустенита для получения структуры нижнего бейнита.

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°C) образуется двухфазная аустенитно-бейнитная структура, в которой сосуществуют  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фазы. В этом случае может происходить обогащение еще не превратившегося аустенита углеродом.

В данной работе исследовали промышленные низколегированные стали 38ХС (0,36% С, 1,38% Сг и 1,14% Si) и 60С2 (0,62% С и 1,93% Si) после изотермической выдержки в интервале температур бейнитного превращения (350 - 425°C).

Экономнолегированная сталь 38ХС является одной из широко используемых в различных отраслях машиностроения конструкционных сталей, применяемых при производстве высокопрочных метизов размером до 20 – 25 мм в поперечнике и имеющих после светлой изотермической закалки структуру бескарбидного бейнита. Рассмотрим на примере этой стали закономерности развития бейнитного превращения и роль остаточного аустенита в формировании структуры и ударной вязкости после различных режимов изотермической закалки с последующей обработкой в жидком азоте (при -196°C, в течение 1 ч). Результаты измерения количества остаточного аустенита ( $A_{ост}$ ), твердости и ударной вязкости после различных режимов изотермической закалки стали 38ХС с последующей обработкой в жидком азоте представлены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние температуры и времени выдержки при изотермической закалке на термическую устойчивость остаточного аустенита и свойства стали 38 ХС

Режим изотермической закалки	Количество остаточного аустенита, $A_{ост}$ , %		Относительная устойчивость остаточного аустенита, $(A_{ост}^{-196^{\circ}C} / A_{ост}^{20^{\circ}C}) \cdot 100$ , %	Твердость, HRC	КСУ, МДж/м <sup>2</sup> после охлаждения при $T = -196^{\circ}C$
	при 20°C	после обработки при $T = -196^{\circ}C$			
360°C, 10 мин	20	17	42	85	0,9
360°C, 30 мин	22	19	42	81	1,0
375°C, 10 мин	21	18	41	86	0,8
375°C, 20 мин	23	21	40	91	1,1
375°C, 30 мин	20	20	40	100	1,2
400°C, 10 мин	26	17	39	65	0,4
400°C, 20 мин	27	18	38	67	0,5
400°C, 30 мин	28	11	38	39	0,4

Время выдержки при изотермической закалке подбирали таким образом, чтобы обеспечить протекание бейнитного превращения и получение значительного количества остаточного аустенита после охлаждения. Видно, что его максимальное количество (26 - 28%) наблюдается при температуре 400°C после закалки в верхнем бейнитном интервале. Однако после обработки холодом этот остаточный аустенит в заметной степени распадается. Термическую устойчивость остаточного аустенита удобно характеризовать отношением его количества, сохранившегося в стали после охлаждения до температуры жидкого азота ( $A_{ост}^{-196^{\circ}C}$ ), к количеству остаточного аустенита, полученного в стали после изотермической выдержки и охлаждения до комнатной температуры ( $A_{ост}^{20^{\circ}C}$ ), т.е. величиной ( $A_{ост}^{-196^{\circ}C} / A_{ост}^{20^{\circ}C}$ ) 100, % (см. табл. 1). Относительная устойчивость остаточного аустенита, полученного в верхнем температурном интервале 400°C, меняется от 39 до 65%, т. е. этот аустенит термически нестабилен. При обработке в нижней части бейнитного интервала 360 – 375°C количество  $A_{ост}^{20^{\circ}C}$  несколько меньше (20 - 23%), однако его термическая стабильность высокая, до 100%. Это означает, что мартенситная точка такого остаточного аустенита находится ниже температуры жидкого азота, и свидетельствует о значительном пересыщении остаточного аустенита по углероду.

Следует отметить, что относительная устойчивость остаточного аустенита при температуре жидкого азота хорошо коррелирует с изменением ударной вязкости стали после изотермической закалки (см. табл. 1). Чем выше эта устойчивость, особенно после обработки в нижнем интервале бейнитного превращения 360 – 375°C, тем выше значения ударной вязкости в сочетании с достаточно высокой твердостью.

Аналогичная картина изменения механических свойств наблюдается и в стали 60С2 после различных режимов изотермической выдержки в интервале температур 350–425°C (табл. 2).

Таблица 2. Влияние температуры и времени изотермической закалки на термическую устойчивость остаточного аустенита и свойства стали 60С2

Режим изотермической закалки	Количество остаточного аустенита, $A_{ост}$ , %		Относительная устойчивость остаточного аустенита, $(A_{ост}^{-196^{\circ}C} / A_{ост}^{20^{\circ}C}) \cdot 100$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup> после охлаждения при $T = -196^{\circ}C$
	при 20°C	после обработки при $T = -196^{\circ}C$		
350°C, 5 мин	30	19	63	0,3
350°C, 10 мин	34	29	85	0,9
350°C, 20 мин	31	31	100	0,8
400°C, 5 мин	35	30	86	0,8
400°C, 10 мин	34	32	94	0,9
425°C, 5 мин	37	21	57	0,5
425°C, 10 мин	35	21	60	0,7

Из табл. 2 видно, что термическая устойчивость остаточного аустенита в процессе развития превращения постепенно повышается и достигает полной (100%) устойчивости после выдержки при температурах 350 - 400°C к распаду в жидком азоте, когда количество остаточного аустенита начинает уменьшаться при увеличении времени изотермической выдержки. Интерес представляет тот факт, что в малолегированной стали после достаточно простой обработки в интервале бейнитного превращения возможно получение значительного количества (более 30%) остаточного аустенита, термически стабильного не только при комнатной температуре, но и после длительной (в течение 1 ч) выдержки в жидком азоте. Такая устойчивость остаточного аустенита безусловно связана с обогащением его углеродом в процессе фазового превращения. Из анализа данных, приведенных в табл. 2 видно, что после исследованных режимов изотермической закалки максимальные значения ударной вязкости стали наблюдаются при термической устойчивости остаточного аустенита выше 85%.

Таким образом, в работе обнаружено, что для исследованных сталей, в которых бейнитная структура образуется при изотермической закалке, термическая устойчивость (стабильность при глубоком охлаждении) остаточного аустенита, независимо от его количества, может характеризовать морфологические особенности структурных составляющих фазовых превращений (бескарбидный бейнит или бейнит с карбидами), и уровень ударной вязкости стали. Установлено, что термическая стабильность остаточного аустенита зависит от режимов термообработки и связана с обогащением его углеродом. В случае образования бескарбидного бейнита наблюдается высокая термическая стабильность остаточного аустенита (отсутствие его превращения вплоть до температуры жидкого азота). Установлено, что при термической стабильности остаточного аустенита в бескарбидном бейните более 85% сталь при почти одинаковой прочности обладает уровнем ударной вязкости, в 2 – 3 раза выше, чем в случае с бейнитом, содержащим карбидные выделения.

В работе выявлена четкая взаимосвязь количества и свойств остаточного аустенита, содержащегося в структуре конструкционных легированных сталей после закалки в бейнитной области температур, и впервые разработан магнитный способ неразрушающего контроля качества применяемой термической обработки и уровня ударной вязкости и трещиностойкости деталей при сохранении их целостности [1, 2].

Разработанный способ осуществляется полностью неразрушающим методом и позволяет проводить экспресс-контроль качества ответственных изделий из конструкционных легированных сталей, термообработанных методом светлой изотермической закалки в бейнитном интервале температур, подвергающихся при эксплуатации значительным ударным нагрузкам. Способ позволяет осуществлять процесс неразрушающего контроля ударной вязкости серийных и крупносерийных изделий ответственного назначения непосредственно в условиях термического цеха, а также контролировать качество проведенного режима изотермической закалки и ресурс эксплуатации ответственных деталей и изделий.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Патент РФ Способ оценки уровня ударной вязкости изделий из закаленной на бейнит конструкционной стали / А.Ю. Калетин, Ю.В. Калетина; заявитель и патентообладатель ИФМ УрО РАН. – № 2 795 665, заявл. 25.11.2022; опубл. 16.05.23, Бюл. № 14.
2. Остаточный аустенит в структуре бескарбидного бейнита и его влияние на ударную вязкость конструкционных сталей / А.Ю. Калетин, Ю.В. Калетина, Ю.Н. Симонов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* —2023.— № 11. — С. 10 — 15.