

УДК 669.15.74.-194-15.669.17

- Малинов Л. С. д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Материаловедение и перспективные технологии» ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, e-mail: malinov\_l\_s@pstu.edu
- Малинов В. Л. д-р техн. наук, ПИИ ООО «Бюро Веритас Украина», г. Мариуполь, e-mail: malinov.v.l@gmail.com
- Бурова Д. В. канд. техн. наук, ст. препод. кафедры «Материаловедение и перспективные технологии» ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, e-mail: burovadasha1990@gmail.com

## ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ ЭКОЛОГИЧНЫМ СПОСОБОМ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ И СТУПЕНЧАТОЙ ЗАКАЛКИ

**Актуальность работы.** Повышение механических свойств сталей позволяет увеличить эксплуатационную стойкость деталей машин, что является важной задачей материаловедения. Одним из перспективных направлений в ее решении является получение у них многофазной структуры, одной из основных составляющих которой является метастабильный аустенит, претерпевающий при нагружении динамическое деформационное мартенситное превращение (ДДМП)-эффект самозакалки при нагружении (СЗН). Способами, обеспечивающее требуемую структуру, являются изотермическая и ступенчатая закалка. Однако в настоящее время при их проведении для охлаждения аустенитизации и выдержки при постоянной температуре используются неэкологичные вещества: нагретое масло, расплавы солей или щелочей. В связи с этим актуальной проблемой является их исключение из технологического процесса. В работе на ряде сталей показана возможность решения этой проблемы.

**Цель работы** – показать возможность повышения механических свойств исследованных сталей 30ХГСА, 38ХС, 45Г, 40ХН, 10Г12, 60Х18 применением рациональных режимов экологичного способа закалки сталей (изотермической – для низколегированных и ступенчатой – для высоколегированных) за счет получения в их структуре наряду с другими составляющими метастабильного остаточного аустенита и реализации эффекта СЗН.

**Методы исследования.** Образцы исследованных сталей после аустенитизации (в ряде случаев с выдержкой в межкритическом интервале температур – МКИТ) охлаждались в воде до температуры образования нижнего бейнита (изотермическая закалка) или стабилизации переохлажденного аустенита к мартенситному превращению при охлаждении (ступенчатая закалка), после чего выдерживались в печи, и охлаждались на воздухе до комнатной температуры. Применялись дюротрический, металлографический и рентгеновский методы исследования. Определялись механические свойства при растяжении и ударная вязкость. Эти свойства сравнивались с полученными у исследуемых сталей после типовой термообработки, включающей закалку в масле и отпуск.

**Результаты.** Показано, что изотермическая и ступенчатая закалка исследованных сталей без использования неэкологичных веществ, проведенная по рациональным режимам, позволяет повысить механические свойства по сравнению с их уровнем после обычно применяемой закалки в масле (пожароопасно, пары канцерогенны), и отпуска. Это достигается получением многофазной структуры с метастабильным аустенитом.

**Научная новизна.** Предложено для повышения механических свойств исследованных сталей получать у них многофазную структуру с метастабильным аустенитом проведением изотермической и ступенчатой закалки экологичным способом без использования нагретого масла, расплавов солей или щелочей.

**Практическая ценность.** Для исследованных сталей определены режимы изотермической и ступенчатой закалки экологичным способом, позволяющие повысить механические свойства по сравнению с уровнем, достигаемым закалкой и отпуском. При этом в отличие от аналогичного типового способа закалки исключены затраты на приобретение солей или щелочей, их утилизацию, промывку изделий от них. По сравнению с закалкой и отпуском новый способ не требует применения масла и отпуска. Последнее улучшает экологию и снижает энергозатраты при термообработке.

**Ключевые слова:** экологичный способ закалки, мартенсит, нижний бейнит, карбиды, метастабильный остаточный аустенит, самозакалка при нагружении, механические свойства.

### Введение

Экологичность и энергосбережение технологи-

ческих процессов являются важными требованиями к ним. Добиться этого при закалке конструкционных

легированных сталей можно, исключив применение при ее проведении неэкологичных закалочных сред (масла, расплавов солей, щелочей). Снизить энергозатраты при термообработке позволяет исключение отпуска, применяемого после закалки. Однако это можно осуществить только в том случае, если после закалки будет получена соответствующая структура, обеспечивающая требуемый уровень механических свойств.

В работе [1] предложено и получило дальнейшее развитие [2–4] перспективное инновационное научно-прикладное направление по получению в сплавах на железной основе многофазной структуры (мартенсит, бейнит, феррит, карбиды, карбонитриды и другие фазы, а также их разнообразные сочетания), одной из основных составляющих которых является метастабильный аустенит, претерпевающий ДДМП при нагружении. Для получения наиболее высокого уровня свойств количеством и стабильностью аустенита необходимо управлять с учетом исходных химического, фазового состава и условий нагружения. При этом важно также использовать сочетание различных известных механизмов упрочнения и сопротивления разрушению (дислокационный, зернограничный, субзеренный и др.) [1]. Этому направлению положили начало работы И. Н. Богачева и Р. И. Минца в середине прошлого века, предложивших в сплавах на основе железа, меди и титана получать метастабильные твердые растворы, претерпевающие в процессе испытаний механических свойств или эксплуатации мартенситные превращения [5, 6]. Это принципиально отличалось от общепринятого их использования при проведении упрочняющих обработок сплавов на стадии изготовления изделий. Указанные работы явились основой создания современных материалов различного назначения с метастабильной структурой, способной под влиянием внешних воздействий к самоорганизации (самотрансформации) [7], что позволяет им иметь свойства существенно более высокие, чем обычно достигаемые в настоящее время.

#### Анализ публикаций по теме работы

Большинство исследований сплавов на железной основе посвящено разработке или изучению высоколегированных и среднелегированных сталей, а также чугунов с метастабильным аустенитом, в том числе полученным закалкой с повышенных температур [8–11]. Однако разнообразным технологиям получения метастабильного аустенита в структуре сплавов, уделяется еще недостаточное внимание. Между тем, в работах [1–4] метастабильный аустенит, получаемый применением разнообразных технологий в структуре сплавов наряду с другими составляющими, рассматривается как важнейший внутренний ресурс сплавов, смартструктура [12], позволяющая им адаптироваться, к внешним нагрузкам [13], существенно самоповышать свои свойства и сопротивление к разрушению в процессе испытаний свойств или эксплуатации. Это открывает широкие возможности в ресурсо- и энергосбережении за счет получения в структуре применяе-

мых в промышленности сталей и чугунов метастабильного аустенита.

Одними из способов термообработки, обеспечивающих получение в структуре сталей наряду с другими составляющими метастабильного аустенита в структуре, регулирования его количества и стабильности по отношению к ДДМП для его оптимизации применительно к условиям нагружения и получения повышенного уровня механических свойств, являются изотермическая и ступенчатая закалка. Однако они в настоящее время проводятся с применением для охлаждения и выдержки неэкологичных веществ масла, расплавов солей или щелочей [14]. На их приобретение, утилизацию, промывку от них изделий требуются дополнительные затраты. В связи с этим предложен экологичный способ изотермической и ступенчатой закалки, позволяющий получать в структуре сталей метастабильный аустенит и за счет этого повышать их механические свойства [15]. Его принципиальным отличием от применяемого аналогичного способа является то, что после аустенитизации (в ряде случаев в МКИТ), охлаждение и выдержка проводятся по схеме вода-печь.

Однако этот вопрос еще мало изучен, в связи с чем целесообразно дальнейшее исследование структуры и свойств различных конструкционных сталей с целью отработки рациональных режимов изотермической и ступенчатой закалки по новому способу, обеспечивающему экологичность, экономичность и получение хорошего сочетания механических свойств.

#### Методы и материалы

Объектом исследований являлись стали 30ХГСА, 38ХС, 45Г, 40ХН, 10Г12, 60Х18, химический состав которых и критические точки  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  приведены в табл. 1.

Выбор среднеуглеродистых низколегированных сталей обусловлен тем, что для них применяется чаще всего улучшение, реже – изотермическая закалка в расплаве солей или щелочей. Для высоколегированных сталей 10Г12 и 60Х18, относящихся к мартенситному классу, типовой термообработкой является закалка (10Г12) или закалка с низким отпуском (60Х18). В работе исследовалось влияние ступенчатой закалки этих сталей по новому экологичному способу на структуру, фазовый состав и механические свойства. Особенностью изотермической закалки в данной работе являлось также и то, что в отличие от общепринятого способа, аустенитизация проводилась не только при типовых температурах, но и с выдержкой в МКИТ. При проведении закалки образцов исследованных сталей с охлаждением и выдержкой по схеме вода-печь их охлаждение осуществлялось до требуемой температуры изотермы по времени, определенному на образцах-свидетелях с зачеченными в их центре термодатчиками. Применялись дюрметрический, металлографический методы исследования, а также рентгеновский фазовый анализ с использованием дифрактометра ДРОН-4.

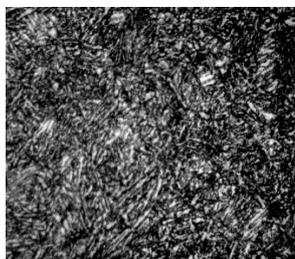
**Таблиця 1** – Хімічний склад досліджуваних сталей, мас. %

Марка сталі	Содержание элементов, мас. %							Критические точки, °С	
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>
30ХГСА	0,33	0,92	0,96	0,96	0,05	0,012	0,014	760	830
38ХС	0,39	1,28	0,39	1,38	0,23	0,024	0,017	763	810
40Г	0,38	0,22	0,80	0,30	0,20	0,021	0,013	723	785
40ХН	0,37	0,21	0,50	0,62	1,10	0,025	0,020	735	778
10Г12	0,12	0,23	11,44	0,20	0,20	0,021	0,018	490	610
60Х18	0,56	0,24	0,40	17,60	0,30	0,026	0,016	*	*

Примечание. \* – не приведены, т. к. аустенитизация проводилась при типовой температуре.

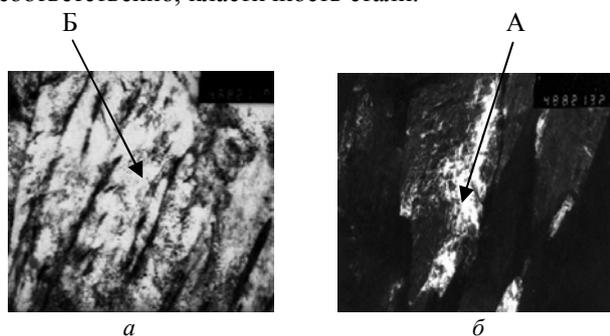
**Результаты исследований и их обсуждение**

Рассмотрим влияние изотермической закалки стали 30ХГСА по новому способу из МКИТ (нагрев на 790 °С, 30 мин, охлаждение в воде до 350 °С, выдержка 60 мин, охлаждение на воздухе) на ее микроструктуру (рис. 1).



**Рис. 1.** Микроструктура стали 30ХГСА после изотермической закалки из МКИТ: нагрев на 790 °С, выдержка 30 мин, охлаждение до 300 °С, выдержка 60 мин, охлаждение на воздухе, ×500

Она включает, нижний бейнит (основа), феррит (~ 15 %) и аустенит (~ 15 %). Электронномикроскопические исследования стали 30ХГСА после изотермической закалки по новому способу показали, что нижний бейнит имеет речное строение с малой плотностью дислокаций внутри реек по сравнению с речным мартенситом (рис. 2а) [16]. Это должно обеспечить их высокую подвижность при нагружении и, соответственно, пластичность стали.



**Рис. 2.** Электронномикроскопическая структура стали 30ХГСА после изотермической закалки нагрев на 790 °С, 30 мин, охлаждение до 350 °С, выдержка 60 мин, охлаждение на воздухе, × 15000: а - в светлопольном отражении; б - в темнопольном отражении

По границам реек нижнего бейнита располагается-

ся остаточный аустенит, который обнаруживается в темнопольном отражении (рис 2б). Его образование связано с тем, что при выдержке в МКИТ происходит обогащение аустенита углеродом и марганцем. Кроме того, при образовании бейнита имеет место отщеснение углерода в прилегающие участки аустенита, что повышает его стабильность и позволяет ему сохраниться при комнатной температуре. Другие исследованные среднеуглеродистые низколегированные стали после изотермической закалки по указанному выше режиму имеют аналогичную структуру.

Механические свойства исследованных сталей после различных режимов термообработки приведены в сравнении с улучшением по типовой технологии в табл. 2. По сравнению с улучшению по типовой технологии (табл. 2, 1–4, 1) изотермическая закалка из МКИТ по рациональному режиму (нагрев на 790 °С, выдержка 60 мин, охлаждение в воде до 350 °С, выдержка при этой температуре 60 мин, охлаждение на воздухе до комнатной температуры) обеспечивает более высокий уровень механических свойств (табл. 2, 1–4, 2). Особенно высок уровень пластичности ( $\delta = 25 \%$ ,  $\psi = 67 \%$ ) и ударной вязкости ( $KCU = 1,8 \text{ МДж/м}^2$ ).

Согласно данным рентгеновского анализа, при нагружении в процессе испытаний образцов остаточный аустенит претерпевает динамическое деформационное мартенситное превращение (ДДМП), и в участке вблизи зоны разрушения он отсутствует. Следствием этого является повышение пластичности и ударной вязкости (ПНП-эффект) [17]. Не исключено, что этому также способствует повышенная пластичность самого бейнита и присутствие в структуре ~15 % феррита, равномерно распределенного в структуре в виде зерен размером  $10\text{--}20 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ , очищенного от углерода и азота, перешедших в аустенит при выдержке в МКИТ. Данные, подтверждающие достижение после изотермической закалки с нагревом в МКИТ повышенной пластичности и ударной вязкости по сравнению с улучшением по типовому режиму, также получены у сталей 38ХС, 45Г, 40ХН (табл. 2). Необходимым условием их получения является создание микронеоднородной структуры, сочетающей нижний бейнит, феррит и остаточный метастабильный аустенит при оптимальных их соотношениях и степени стабильности последнего по отношению к ДДМП.

**Таблица 2** – Механические свойства сталей 30ХГСА (1), 38ХС (2), 45Г (3), 40ХН (4) после различных режимов термообработки

Сталь	Термообработка	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>
1.	1. Нагр. 880 °С, выдерж. 10 мин, охл. в масле, отп. 540 °С, 60 мин, охл. в масле	860	1120	10	43	0,5
	2. Нагр. 790 °С, выдерж. 30 мин, охл. в воде до 350 °С, из. выдерж. 60 мин, охл. на воздухе	1030	1160	25	67	1,8
	3. Нагр. 790 °С, выдерж. 60 мин, нагр. 880 °С, выд. 3 мин, охл. в воде до 350 °С, из. выд. 30 мин, охл. на воздухе	1210	1310	16	59	1,5
2.	1. Нагр. 900 °С, выдерж. 10 мин, охл. в масле, отп. 630 °С, 60 мин, охл. в масле.	770	970	11	53	0,7
	2. Нагр. 780 °С, 60 мин, охл. в воде до 350 °С, из. выд. 30 мин, охл. на возд.	900	1070	21	60	1,3
	3. Нагр. 790 °С, выдерж. 60 мин, нагр. 900 °С, выд. 3 мин, охл. в воде до 350 °С, из. выд. 30 мин, охл. на возд.	1240	1490	15	55	1,1
3.	1. Нагр. 880 °С, 20 мин, охл в масле, отп. 550 °С, 60 мин, охл в масле	806	915	12	47	0,6
	2. Нагр. 760 °С, 60 мин, охл. в воде до 350 °С, из. выд. 30 мин, охл. на возд.	820	949	24	62	1,4
4.	1. Нагр. 820 °С, 20 мин, охл. в масле, отп. 530, 60 мин, охл в масле.	810	1005	11	45	0,7
	2. Нагр. 770 °С, 20 мин, охл. в воде до 350 °С, из. выд. 60 мин, охл. на возд.	887	997	16	60	1,0

В структуре может присутствовать небольшое количество карбидов, не растворившихся при нагреве в МКИТ.

Применение изотермической закалки с предварительным нагревом и выдержкой в МКИТ, последующей кратковременной аустенитизацией, сохраняющей неоднородность химического состава, аустенита, полученную при выдержке в МКИТ, а также исключение феррита из структуры стали после закалки, позволило получить у сталей 30ХГСА и 38ХС повышенные прочностные свойства, пластичность и ударную вязкость (табл. 2, (1, 2), 3).

Эти свойства значительно превышают их уровень после улучшения. Такая термообработка дает возможность дополнительно измельчить зерно, сохранить в структуре метастабильный аустенит и исключить из структуры феррит [1–4]. Изменяя режимы изотермической закалки исследованных сталей, можно у них в широких пределах варьировать соотношения структурных составляющих и, соответственно, механические свойства.

Ступенчатая закалка по новому способу использована для повышения механических свойств стали 10Г12 (табл. 3) [18].

После обычной закалки в воде с 800 °С эта сталь имела трехфазную структуру ( $\alpha$ -мартенсит ~ 55 %,  $\epsilon$ -мартенсит ~ 15 %,  $\gamma$ -фаза ~ 30 %). Ее прочностные свойства соответствовали уровню среднеуглеродистых низколегированных сталей после улучшения ( $\sigma_{0,2} = 850$  МПа,  $\sigma_B = 1200$  МПа). Однако пластичность и ударная вязкость были существенно ниже, чем у них ( $\delta = 7$  %,  $\psi = 9$  %, КСУ = 0,25 МДж/м<sup>2</sup>).

**Таблица 3** – Механические свойства стали 10Г12 после ступенчатой закалки с различных температур в воде и выдержки при 400 °С 60 мин

Температура, t, °С	HRC	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>
700	41	880	1220	14	4 5	0,60
800	40	1030	1400	14	4 0	0,65
900	39	810	1280	14	2 5	0,45

Это объясняется слишком интенсивным образованием  $\alpha$ -мартенсита деформации при испытаниях механических свойств, о чем свидетельствует большая разница между уровнями предела текучести и временного сопротивления [1–4]. В этом случае повысить пластичность и ударную вязкость стали (табл. 3) возможно за счет стабилизации аустенита по отношению к ДДМП, которая в наибольшей степени проявляется после термообработки с выдержкой при 400 °С в результате закрепления дислокаций атомами внедрения. Наиболее хорошее сочетание механических свойств получено после ступенчатой закалки с 800 °С и выдержке при 400 °С 60 мин [17]. Рассмотренный в работе способ ступенчатой закалки без применения расплавов может быть реализован с выдержкой, как ниже, так и выше точки Мн. при этом в ряде случаев отпуск не требуется.

Ступенчатая закалка оказалась эффективной для повышения механических свойств стали 60Х18 [19].

После типовой термообработки, включающей закалку с 1050 °С в масло и отпуск при температуре 200 °С, 60 мин получен следующий уровень механических свойств стали:  $\sigma_{0,2} = 1210$  МПа,  $\sigma_b = 1471$  МПа,  $\delta = 4\%$ ,  $\psi = 8\%$ .

Ступенчатой закалка стали 60X18 с 1050 °С, охлаждением в воде до 350 °С и выдержкой при ней 90 мин позволяет получить существенно более высокий уровень механических свойств:  $\sigma_{0,2} = 1516$  МПа,  $\sigma_b = 1580$  МПа,  $\delta = 16\%$ .

Для реализации рассматриваемого способ могут быть использованы имеющиеся на предприятиях источники нагрева и устройства для охлаждения, заочно-отпускные агрегаты, оборудование, оснащенное кроме нагревательных устройств, камерами душирования, спрейерного или водовоздушного охлаждения. Способ охлаждения зависит также от устойчивости переохлажденного аустенита к образованию ферритно-карбидной смеси.

### Выводы

1. Изотермическая или ступенчатая закалка исследованных сталей с охлаждением после аустенитизации и выдержкой при температуре изотермы по схеме вода-печь является альтернативой широко применяемому в промышленности аналогичному способу, в котором используются нагретое масло неэкологичные расплавы солей или щелочей, а также способу, включающему закалку в масле и отпуск.

2. Изотермическая закалка среднеуглеродистых низколегированных сталей по новому способу с выдержкой в МКИТ позволяет получить при требуемом или более высоком уровне прочностных свойств высокую пластичность и ударную вязкость, не достижимые улучшением, широко применяемым в промышленности. Кратковременная аустенитизация после выдержки в МКИТ дополнительно обеспечивает увеличение прочностных свойств, при сохранении повышенной пластичности.

3. Экологичная ступенчатая закалка высоколегированных сталей мартенситного класса по рациональным режимам повышает прочностные и пластические свойства по сравнению уровнем после закалки (сталь 10Г12), закалки и отпуска (сталь 60X18).

4. Повышение свойств исследованных сталей после изотермической и ступенчатой закалки по новому способу достигается получением у сталей многофазной структуры, в которой наряду с другими составляющими присутствует метастабильный остаточный аустенит, количество и степень стабильности которого оптимальны применительно к конкретным условиям нагружения.

5. В результате изотермической и ступенчатой закалки без использования масла, расплавов солей или щелочей обеспечивается ресурсосбережение и экологичность технологического процесса.

### Список литературы

1. Малинов Л. С. Разработка экономнолегированных высокопрочных сталей и способов упрочнения с использованием принципа регулирования мар-

тенситных превращений : дис. ... докт. техн. наук: 05.16.01 / Малинов Леонид Соломонович. – Екатеринбург : УПИ, 1992. – 381 с.

2. Малинов Л. С. Экономнолегированные сплавы с мартенситными превращениями и упрочняющие технологии / Л. С. Малинов, В. Л. Малинов – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2007. – 352 с.

3. Малинов Л. С. Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки / Л. С. Малинов, В. Л. Малинов. – Мариуполь : Рената, 2009. – 567с.

4. Малинов Л. С. Энерго- и ресурсосберегающие технологии термообработки конструкционных сталей с выдержкой в межкритическом интервале температур: монография / Л. С. Малинов, В. Л. Малинов, Д. В. Бурова. – Мариуполь: ПГТУ, 2020. – 232 с.

5. Богачев И. Н. Кавитационное разрушение углеродистых сплавов / И. Н. Богачев, Р. И. Минц. - М. : Машгиз, 1959. - 110 с.

6. Богачев И. Н. Повышение кавитационно-эрозионной стойкости деталей машин М.: Машиностроение, 1964. - 145 с.

7. Прусаков Б. А. Проблемы материалов в XXI веке (обзор) / Б. А. Прусаков // МиТОМ. – 2001. – № 1. – С. 3–5.

8. Филиппов М. А. Стали с метастабильным аустенитом / М. А. Филиппов, В. С. Литвинов, Ю. Р. Немировский. – М. : Металлургия, 1988. – 256 с.

9. Попов В.С. Металловедческие аспекты износостойкости сталей и сплавов / В.С Попов, Н.Н. Брыков. – 3.: ВПК Запоріжжя, 1996. – 180 с.

10. Чейлях А.П. Экономнолегированные метастабильные сплавы и упрочняющие технологи / А.П. Чейлях. - Мариуполь: ПГТУ. -2009. – 483 с.

11. Брыков М. Н. Износостойкость сталей и чугунов при абразивном изнашивании / М. Н. Брыков, В. Г. Ефременко, А. В. Ефременко – Херсон : Гринь Д.С., 2014. – 364 с.

12. Малинов Л. С. Метастабильный аустенит - смартструктура, обеспечивающая сплавам самозащиту от разрушения / Л.С. Малинов // Університетська наука. – 2020 : тези доп. Міжнар. науково-техн. конф. (Маріуполь, 20–21 травня 2020 р.) : т. 1 / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь: ПДТУ, 2020. – С. 116–117.

13. Малинов Л. С. Стали и чугуны с метастабильным аустенитом и эффектом самозакалки при нагружении – разновидность адаптационных материалов, повышающих свои свойства при внешнем воздействии за счет самоорганизации структуры / Л. С. Малинов // Металл и литье Украины. – 2003. – № 11. – С. 3–9.

14. Смирнов М. А. Основы термической обработки стали / М. А. Смирнов, В. М. Счастливец, Л. Г. Журавлев. – М. : Наука и технологии, 2002. – 519 с.

15. Малинов Л. С. Засіб термообробки : пат. № 6414 на корисну модель Україна, МПК С21D1/00 № 20040706300; Заявл. 28.07.2004; // Л. С. Малинов. Опубл. 16.05.2005, Бюл. № 5.

16. Малинов Л. С. Механические свойства стали 30ХГСА после изотермической закалки из межкритического интервала температур по новому способу / Л. С. Малинов // Л. С. Малинов, Д. В. Бурова // *Нові матеріали і технології В металургії та машинобудуванні*. – 2019. – № 2. – С. 97–99.

17. Георгиева И.Я. Высокопрочные стали с пластичностью, наведенной мартенситным превращением / И.Я. Георгиева // *Итоги науки и техники. Металловедение и термическая обработка*. – М. : ВИНТИ. – 1982. – С. 69–104.

18. Малинов Л.С. Повышение механических свойств стали 10Г12 за счет рациональных режимов

термообработки / Л. С. Малинов В. А. Харлашкин, О. А. Глебова // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – № 2/5 (56). – С. 27–29.

19. Влияние количества и степени стабильности остаточного аустенита на абразивную и ударно-абразивную износостойкость и механические свойства сталей 60Х18 и 95Х18 / Малинов Л. С., Солидор Н. А., Милентьев В. А., Алексеева В. Д. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2009. – № 6/1 (42). – С. 23–24.

Одержано 23.06.2021

### **Малинов Л. С., Малинов В. Л., Бурова Д. В. Підвищення властивостей сталей екологічним способом ізотермічного і ступінчатого гарту**

**Актуальність роботи.** Підвищення механічних властивостей сталей дозволяє збільшити експлуатаційну стійкість деталей машин, що є важливим завданням матеріалознавства. Одним з перспективних напрямків в її вирішенні є отримання у них багатофазної структури, однією з основних складових якої є метастабільний аустеніт, що зазнає при навантаженні динамічне деформаційне мартенситне перетворення (ДДМП) – ефект самогартування при навантаженні (СГН). Способами, що забезпечують необхідну структуру, є ізотермічний і ступінчатий гарт. Однак в даний час при їх проведенні для охолодження з температури аустенітизації і витримки при постійній температурі використовуються неекологічні речовини: нагріте масло, розплави солей або лугів. У зв'язку з цим актуальною проблемою є виключення їх з технологічного процесу. В роботі на ряді сталей показана можливість вирішення цієї проблеми.

**Мета роботи** – показати можливість підвищення механічних властивостей досліджених сталей 30ХГСА, 38ХС, 45Г, 40ХН, 10Г12, 60Х18 застосуванням раціональних режимів екологічного способу гартування сталей (ізотермічного - для низьколегованих і ступінчатого - для високолегованих) за рахунок отримання в їх структурі поряд з іншими складовими метастабільного залишкового аустеніту і реалізації ефекту СГН.

**Методи дослідження.** Зразки досліджених сталей після аустенітизації (в ряді випадків з витримкою в межкритическій інтервал температур МКІТ) охолоджувалися в воді до температури утворення нижчого бейніта (ізотермічний гарт) або стабілізації переохолодженого аустеніту до мартенситного перетворення при охолодженні (ступінчатий гарт), після чого витримувалися в печі, і охолоджувалися на повітрі до кімнатної температури. Застосовувалися дюрOMETричний, металографічний і рентгенівський методи дослідження. Визначалися механічні властивості при розтягуванні і ударна в'язкість. Ці властивості порівнювалися з отриманими у досліджуваних сталей після типовий термообробки, що включає гартування в маслі і відпуск.

**Результати.** Показано, що ізотермічний і ступінчатий гарт досліджених сталей без використання не-екологічних речовин, проведений по раціональним режимам, дозволяє підвищити механічні властивості в порівнянні з їх рівнем після гартування в маслі (пожаронебезпечно, пари канцерогенні) і відпуску, що зазвичай застосовується. Це досягається отриманням багатофазної структури з метастабільним аустенітом.

**Наукова новизна.** Запропоновано для підвищення механічних властивостей досліджених сталей отримувати у них багатофазну структуру з метастабільним аустенітом проведенням ізотермічного і ступінчатого гартування екологічним способом без використання підігрітого масла, розплавів солей або лугів.

**Практична цінність.** Для досліджених сталей визначені режими ізотермічного і ступінчатого загартування екологічним способом, що дозволяють підвищити механічні властивості в порівнянні з рівнем, що досягається при загартуванні і відпуску. При цьому на відміну від аналогічного типового способу гарту виключені витрати на придбання солей або лугів, їх утилізацію, промивку виробів від них. У порівнянні з гартуванням і відпуском новий спосіб не вимагає застосування масла та відпуску. Останнє покращує екологію, знижує енерговитрати при термообробці.

**Ключові слова:** екологічний спосіб гартування, мартенсит, нижній бейніт, карбіди, метастабільний залишковий аустеніт, самогартування при навантаженні, механічні властивості.

### **Malinov L., Malinov V., Burova D. Increasing of the steels properties by an ecological method of isothermal and step quenching**

**The relevance.** Improving the mechanical properties of steels makes it possible to increase the service life of machine parts, which is an important task in materials science. One of the promising directions in its solution is to obtain in steel a multiphase structure, one of the main components of which is metastable austenite, which undergoes a dynamic deformation martensitic transformation (DDMT) - self-hardening effect under loading (SHL). Methods providing the required structure are isothermal and step quenching. However, at present, when they are carried out for cooling

from the austenitizing temperature and holding at the constant temperature used non-environmentally friendly substances: heated oil, molten salts or alkalis. In this regard the actual problem is the exclusion of them from the technological process. The possibility of solving this problem on several steels has shown.

**Purpose** is to show the possibility of increasing the mechanical properties of the studied steels 30ХГСА, 38ХС, 45Г, 40ХН, 10Г12, 60Х18 by using rational modes of an environmentally friendly method of steels quenching (isothermal - for low-alloyed and step - for high-alloyed) due to obtaining in their structure along with other components of metastable residual austenite and the implementation of the SHL effect.

**Research methods.** Samples of the investigated steels after austenitization (in some cases with holding in ICIT) were cooled in water to the temperature of lower bainite formation (isothermal quenching) or stabilization of supercooled austenite to martensitic transformation upon cooling (step quenching), after which they were kept in a furnace and cooled in air to room temperature. Durometric, metallographic and X-ray research methods were used. The tensile properties and impact strength were determined. These properties were compared with those obtained for the studied steels after a typical heat treatment, including quenching in oil and tempering.

**Results.** It is shown that isothermal and step quenching of the investigated steels without the use of non-environmentally friendly substances, carried out according to rational modes, makes it possible to increase the mechanical properties in comparison with their level after the commonly used quenching in oil (fire hazard, the vapors are cancerogenic) and tempering. This is achieved by obtaining a multiphase structure with metastable austenite.

**Scientific novelty.** It is proposed to obtain a multiphase structure with metastable austenite in them to improve the mechanical properties of the studied steels by conducting isothermal and step quenching in an environmentally friendly way without using heated oil, molten salts or alkalis.

**Practical value.** For the studied steels the modes of isothermal and step quenching are determined in an environmentally friendly way, which make it possible to increase the mechanical properties in comparison with the level achieved by quenching and tempering. Wherein in contrast to a similar typical quenching method are excluded the costs of purchasing salts or alkalis, their disposal and washing of products from them. Compared to quenching and tempering, the new method does not require the use of oil and tempering. The latter improves ecology and reduces energy consumption during heat treatment.

**Key words:** environmentally friendly quenching method, martensite, lower bainite, carbides, metastable retained austenite, self-hardening under loading, mechanical properties.