

- 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 ПОЛУЧЕНИЕМ В ИХ СТРУКТУРЕ НАРЯДУ С ДРУГИМИ СОСТАВЛЯЮЩИМИ МЕТАСТАБИЛЬНОГО АУСТЕНИТА И ПОСЛЕДУЮЩИМ УПРОЧНЕНИЕМ

Актуальность работы. Повышение механических свойств сталей и их износостойкости позволяет увеличить эксплуатационную стойкость деталей машин, что является важной задачей материаловедения. Одним из перспективных направлений в ее решении являются технологии комбинированной обработки, основанные на принципе получения у них разнообразными способами структуры, содержащей наряду с другими составляющими (мартенситом различных типов, нижним бейнитом, в ряде случаев карбидами) повышенного количества ($\geq 25\%$) метастабильного аустенита, и последующим упрочнением. При этом некоторое количество аустенита превращается в мартенсит деформации, а сохранившаяся часть претерпевает динамическое деформационное мартенситное превращение (ДДМП) – эффект самозакалки при нагружении (СЗН). Комбинированные технологии обработки включают термическое (в ряде случаев химико-термическое) и деформационные воздействия на металл, осуществляемые в различных сочетаниях и последовательности. Технологии обработки для получения в структуре сталей повышенного количества метастабильного аустенита могут включать: выдержку в межкритическом интервале температур (МКИТ) при различных способах закалки, пластическую деформацию, стабилизирующую аустенит по отношению к образованию мартенсита охлаждения, термоциклирование и др. Упрочнение сталей, имеющих в структуре повышенное количество метастабильного аустенита, осуществляется холодной пластической деформацией, после которой в ряде случаев проводится отпуск, а также обработками с использованием источников концентрированной энергии (лазерная, электронно-лучевая). Однако, в настоящее время рассматриваемый принцип и реализующие его технологии комбинированной обработки не применяются в промышленности. Это исключает использование метастабильного аустенита, являющегося внутренним ресурсом самого материала, и его трансформацию при нагружении, повышающую его способность к самозащите от разрушения в процессе испытаний свойств и эксплуатации. В связи с этим целесообразным является внедрение в практику предложенных технологий комбинированной обработки, что обеспечит ресурсосбережение. В работе на ряде сталей показана их эффективность.

Цель работы – показать возможность повышения у исследованных сталей механических свойств или износостойкости применением технологий комбинированной обработки, основанных на принципе, предусматривающем получение в их структуре повышенного количества метастабильного аустенита и последующее упрочнение, сохраняющее возможность ДДМП и реализацию эффекта СЗН.

Методы исследования. Применялись дюротметрический, металлографический и рентгеновский методы исследования. Определялись механические свойства при растяжении и ударная вязкость, а также абразивная износостойкость. Эти свойства сравнивались с полученными у исследуемых сталей после типовой термообработки.

Результаты. Показано, что предложенные технологии комбинированной обработки, включающие получение в структуре исследованных сталей повышенного количества метастабильного аустенита и последующее упрочнение, сохраняющее возможность ДДМП и реализацию эффекта СЗН повышают механические свойства или износостойкость по сравнению с их уровнем после обычно применяемой обработки.

Научная новизна. Для повышения механических свойств или износостойкости сплавов предложен инновационный принцип, заключающийся в получении у них перед упрочняющими обработками повышенного количества метастабильного аустенита, сохранив после них его часть, способную претерпеть ДДМП и, соответственно, реализовать эффект СЗН при испытании свойств и эксплуатации.

Практическая ценность. Для исследованных сталей определены рациональные режимы технологий комбинированной обработки, включающие получение в их структуре повышенного количества метастабильного аустенита и последующее упрочнение, показавшие свою эффективность в повышении механических свойств или износостойкости по сравнению с обычно применяемыми обработками.

Ключевые слова: закалка, деформация мартенсит, нижний бейнит, карбиды, метастабильный аустенит, самозакалка при нагружении, механические свойства, износостойкость.

Введение

Общепризнанным стало представление о том, что для повышения свойств сплавов на железной основе в их структуре необходимо получать метастабильный аустенит, превращающийся в мартенсит деформации при нагружении. Большинство исследований посвящено разработке высоколегированных сталей и чугунов, в которых метастабильный аустенит является основной или моноструктурой. В настоящее время одним из перспективных направлений в повышении свойств известных сплавов является получение у них многофазной структуры, в которой метастабильный аустенит присутствует наряду с другими составляющими. В связи с этим важную роль начинают играть технологии, обеспечивающие получение такой структуры. Одним из их перспективных направлений являются комбинированные обработки, инновационный принцип разработки которых рассмотрен в данной статье.

Анализ публикаций по теме работы

Одним из важнейших направлений современного материаловедения является создание сплавов с метастабильной структурой, способной под влиянием внешних воздействий к самоорганизации [1–3], что позволяет им иметь свойства, существенно более высокие, чем обычно достигаемые в настоящее время. Началом работ в этом направлении были исследования, выполненные в середине прошлого века И. Н. Богачевым и Р. И. Минцем. Ими высказана и реализована идея получения в сплавах на основе железа, титана, меди метастабильных твердых растворов, претерпевающих в процессе испытания механических свойств или эксплуатации мартенситные превращения. Это принципиально отличалось от общепринятого их использования в процессе упрочняющих технологий на стадии изготовления изделий. Новые представления позволили разработать высокоэффективные кавитационностойкие стали [4–6]. В дальнейшем установлено, что сплавы с метастабильным аустенитом обладают повышенной износостойкостью при гидроабразивном износе [7], абразивном [8], ударно-абразивном [9] воздействиях, сухом трении [10] и усталостном нагружении [11]. В этих сплавах может быть получен высокий уровень механических свойств [12–13]. Это обусловлено тем, что на развитие мартенситных превращений, протекающих при нагружении, расходуется значительная часть энергии внешнего воздействия и, соответственно, меньшая доля идет на разрушение [14, 15]. Кроме того, в процессе развития мартенситных превращений происходит не только упрочнение, но и релаксация микронапряжений, вследствие чего повышается работоспособность микрообъемов сплавов [16, 17]. Этому способствует динамическое старение [17]. При нагружении протекают также такие структурные изменения как образование дефектов упаковки, увеличение плотности дислокаций, двойникование и др. В

работах [18–20] сплавы с метастабильным аустенитом предложено рассматривать в качестве адаптационных материалов, в которых основную роль в приспособлении их к внешним нагрузкам играют мартенситные превращения. Эти сплавы являются синергетическими системами, способными к самоорганизации структуры под влиянием внешних воздействий. В работах [21–24] обобщены многолетние исследования по созданию экономнолегированных сплавов различных структурных классов и назначения, а также упрочняющих технологий на основе принципа получения многофазных структур, одной из которых является метастабильный аустенит. Для получения высокого уровня свойств его количеством и стабильностью необходимо управлять с учетом исходных химического, фазового составов и условий нагружения. При этом важно также использовать сочетание различных известных механизмов упрочнения и сопротивления разрушению. Такой подход существенно расширяет представления о необходимости получения метастабильного аустенита в структуре нелегированных, низко-, среднелегированных сталей и чугунов. Метастабильный аустенит рассматривается как смартструктура [25] и важнейший внутренний ресурс сплавов, позволяющий существенно повысить их свойства, уменьшить или в ряде случаев исключить полностью дорогие легирующие элементы, используемые для этой же цели. Последнее играет важную роль в ресурсосбережении. В работе [26] приведены разнообразные способы получения в структуре сплавов наряду с другими составляющими метастабильного аустенита. В данной работе рассмотрены результаты исследований по повышению механических свойств и износостойкости сталей за счет комбинированных обработок, основанных на принципе получения в их структуре повышенного ($\geq 25\%$) количества метастабильного аустенита, последующего упрочнения и сохранения при этом у оставшейся части его способности претерпевать ДДМП и реализовать эффект СЗН [27].

Методы и материалы

Комбинированные обработки обеспечивали термическое или/и деформационные воздействия на металл, осуществляемые в различных сочетаниях и последовательности. Схемы комбинированных обработок приведены на рис. 1. Они включали нагрев и выдержку в МКИТ, изотермическую закалку и низкотемпературный отпуск, а также холодную или теплую пластическую деформацию. В ряде случаев осуществлялись цементация, лазерная обработка. Деформация проводилась растяжением, дробеструйной обработкой и обкаткой роликом. Фазовый состав определялся рентгеновским методом на установке ДРОН-3. Механические свойства на растяжение проводились по ГОСТ 9457-88. Образцы на износ испытывались на машине МИ1-М по схеме колодка – ролик и ролик-

ролик. Контртелом служила сталь М76, термообработанная на твердость ~ 60 HRC. Нагрузка при испытании по первой схеме составляла $P = 75$ МПа, скорость скольжения $V = 0,13$ м/с. При испытаниях по второй схеме $P = 320$ МПа, скорость вращения нижнего ролика составляла $V = 0,98$ м/с, а скорость проскальзывания верхнего ролика $V = 0,09$ м/с. За эталон выбиралась соответствующая сталь после типовой для нее термообработки. Потеря массы образцов определялась с точностью до 0,0001 г.

Объектом исследований являлись марганцевые стали 06Г8, (06-07)Г(14-24), 100Г6Ф, а также цементуемая сталь 18ХГТ, пружинная - 60С2А и инструментальная - 9ХС (табл. 1). Они были выбраны в связи с тем, что в них легко можно было получить повышенное количество метастабильного аустенита. Марганцевые стали получают в настоящее время все большее применение в промышленности. Во многих случаях они являются альтернативой более дорогим никельсодержащим сталям, зачастую не только не уступая, но и превосходя их по свойствам. Марганцевые стали характеризуются большим разнообразием структур и фазовых превращений при охлаждении и деформации. В них легко может быть получен в структуре наряду с другими составляющими метастабильный аустенит, упрочнением и стабильностью которого необходимо управлять по отношению к мартенситным превращениям, протекающим при нагружении применительно к конкретным условиям испытаний или эксплуатации.

Таблица 1 – Химический состав исследованных сталей

Сталь	Химический состав исследованных сталей, масс. %			
	С	Mn	Si	Другие элементы
06Г8	0,05	7,80	0,23	-
06Г14	0,06	13,60	0,25	-
06Г16	0,06	16,10	0,22	-
06Г20	0,06	19,60	0,23	-
07Г22	0,07	22,40	0,24	-
07Г24	0,07	23,70	0,21	-
100Г6Ф	1,05	6,2	0,40	0,30 V
18ХГТ	0,17	0,90	0,50	1,09 Cr; 0,05 Ti
60С2А	0,59	0,70	1,70	$\leq 0,30$ Cr; $\leq 0,40$ Ni
9ХС	0,92	0,60	1,60	1,2 Cr

Примечание. S и P $\leq 0,03$ % каждого.

Результаты исследований и их обсуждение

Рассмотрим деформационно-термические комбинированные обработки марганцевых сталей, имеющих структуру $\alpha' - 06Г8$, $\alpha' + \varepsilon + \gamma - 06Г14$ и $\varepsilon + \gamma - (06-07)Г(16-24)$, реализующих для повышения механических свойств принцип получения повышенного количества метастабильного аустенита и последующего упрочнения, сохраняющего его часть, претерпевающую при нагружении ДДМП [21–24].

Сталь 06Г8 после закалки от 900 оС и низкого отпуска (250 °С, 1 ч) имеет в структуре 100 %

α' - мартенсита (α') и следующий уровень механических свойств: $\sigma_{0,2} = 850$ МПа, $\sigma_b = 1100$ МПа, $\delta = 10$ %, $\psi = 45$ %. Холодная пластическая деформация (ХПД) с обжатием 7 % повышает $\sigma_{0,2}$ и σ_b на 100 и 150 МПа, соответственно, и существенно снижает пластичность ($\delta = 3$ %, $\psi = 10$ %). Большая, чем указанная выше, степень ХПД приводит к образованию трещин и не может быть использована. Комбинированная обработка этой стали, включающая нагрев в МКИТ (630 °С, 1 ч), для получения в структуре наряду α' - фазой 30–40 % вторичного метастабильного аустенита, последующую после охлаждения ХПД ($\varepsilon = 10$ %) и низкотемпературный отпуск при 250 °С, 1 ч (рис. 1а), позволяет обеспечить хорошее сочетание прочностных и пластических свойств: $\sigma_{0,2} = 1100$ МПа, $\sigma_b = 1200$ МПа, $\delta = 25$ %, $\psi = 54$ %. Это обусловлено получением в α' - фазе повышенной плотности дислокаций и развитой субструктуры, появлением межфазных границ большой протяженности в связи с образованием вторичного аустенита (микродуплексная структура). Кроме того, после ХПД сохраняется 18 % аустенита, количество которого уменьшается до 8 % за счет превращения его в мартенсит в процессе испытаний механических свойств на растяжение до образования шейки (эффект СЗН). Это является важным фактором повышения временного сопротивления и сохранения повышенной пластичности.

Установлено, что проведение предварительной ХПД рассматриваемой стали ускоряет образование вторичного аустенита при нагреве в МКИТ. Так деформация на 10 % позволяет получить после выдержки 20 мин в нем такое же количество вторичного аустенита, как и после часа без предварительной ХПД. С учётом этого комбинированная обработка (рис. 1б), включающая двукратное ХПД ($\varepsilon = 10$ %) с промежуточным нагревом в МКИТ (630 °С, выдержка 15–20 мин), обеспечивает механические свойства: $\sigma_{0,2} = 1180$ МПа, $\sigma_b = 1300$ МПа, $\delta = 15$ %, $\psi = 50$ %.

В рассматриваемой стали аустенит в структуре может быть получен проведением деформации в МКИТ [28]. Так деформация стали 06Г8 при 630 °С на 20 % позволяет получить в структуре наряду с α' - мартенситом 40 % метастабильного аустенита. Последующая ХПД на 10 % вызывает частичное его превращение в α' - мартенсит. Доля последнего в структуре возрастает на 25 %. Заключительной обработкой для уменьшения уровня внутренних напряжений является низкий отпуск (250 °С, 1 ч). Указанная комбинированная обработка (рис. 1в) обеспечивает повышенный по сравнению с закалкой и низким отпуском уровень механических свойств: $\sigma_{0,2} = 1120$ МПа, $\sigma_b = 1330$ МПа, $\delta = 14$ %, $\psi = 45$ %. Так же, как и в предыдущих случаях, важную роль в формировании механических свойств играет наряду с другими факторами протекание в упрочненном аустените мартенситных превращений при испытании механических свойств.

Комбинированная обработка эффективна и для стали 06Г14, имеющей в исходном состоянии трёхфазную $\alpha' + \varepsilon + \gamma$ структуру. При этом количество α' - мартенсита составляет 42 %, $\varepsilon - 40$ %, а $\gamma - 18$ %.

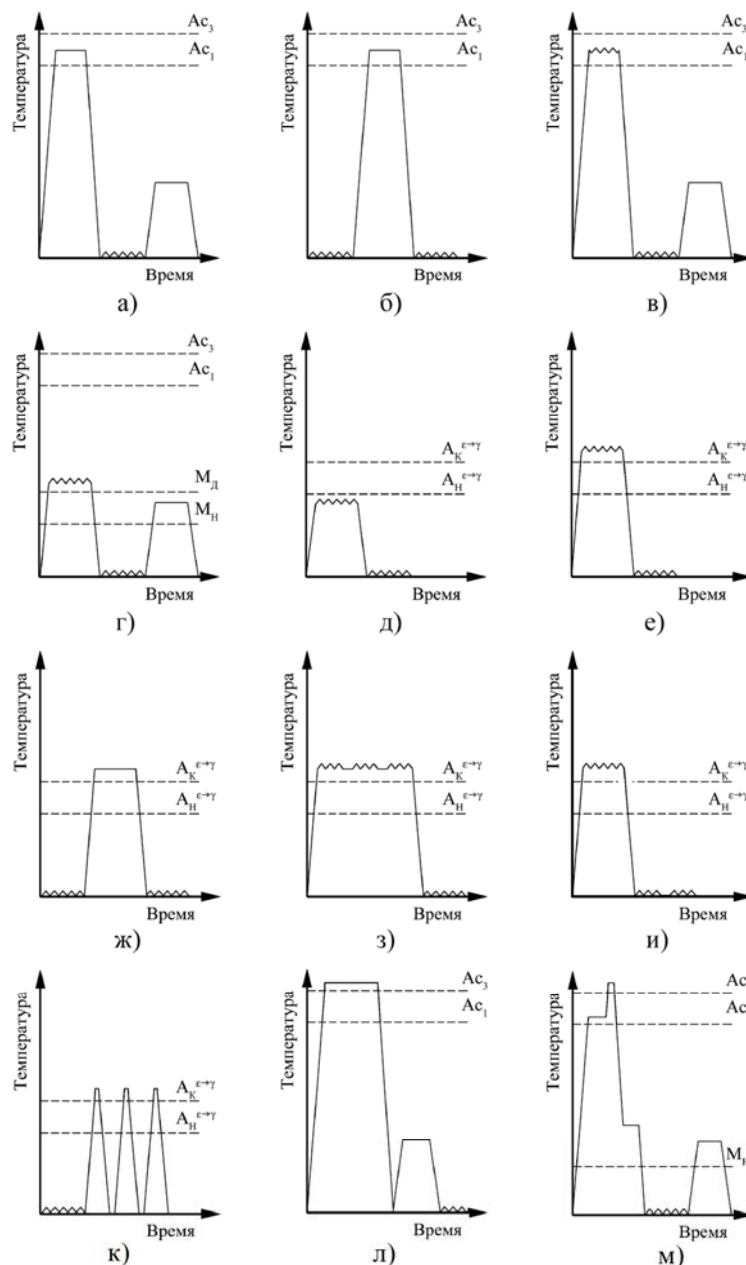


Рис. 1. Схемы комбинированных обработок исследованных сталей

При последующей ХПД количество α -мартенсита возрастает за счёт его образования при деформации (α''), а доля ε - и γ -фаз в структуре уменьшается. Сравнительно небольшое количество мартенсита охлаждения в рассматриваемой стали обуславливает более низкий, чем в предыдущей (06Г8), предел текучести (610 МПа). Временное сопротивление составляет $\sigma_B = 1100$ МПа, а интенсивное образование α -мартенсита деформации при испытаниях механических свойств и его высокая твёрдость являются причиной сравнительно невысоких пластических характеристик ($\delta = 8\%$, $\psi = 15\%$). С учётом этого комбинированная упрочняющая обработка на первом этапе должна предусматривать стабилизацию аустенита. Это наиболее эффективно достигается деформацией при 400 °С со

степенью 20–30 %. При этом формируется ячеистая дислокационная структура аустенита и происходит сегрегация атомов углерода на дислокациях. В результате снижается Mn и увеличивается количество аустенита с 18 до 40–50 %. Одновременно с этим снижается интенсивность деформационного мартенситного превращения. В результате получен следующий уровень механических свойств: $\sigma_{0.2} = 720$ МПа, $\sigma_B = 1050$ МПа, $\delta = 25\%$, $\psi = 34\%$. Последующая ХПД на 10 %, упрочняющая аустенит и уменьшающая его количество до 20–25 % за счёт превращения его в мартенситные фазы, и отпуск при 250 °С (рис. 1з) позволяют в ещё большей степени увеличить прочностные свойства ($\sigma_{0.2} = 1020$ МПа, $\sigma_B = 1320$ МПа) при сохранении достаточной пластичности ($\delta = 15\%$, $\psi = 38\%$). Получение такого уровня

свойств также, как и в предыдущих случаях, наряду с другими факторами обусловлено процессами мартенситообразования в упрочненном аустените при механических испытаниях.

Теплая деформация сталей, содержащих 16–22 % марганца, со структурой $\varepsilon + \gamma$ уже при 130–200 °С приводит к существенному изменению фазового состава. Принципиальным отличием деформации в указанном интервале температур от ХПД при комнатной температуре является то, что снижению количества ε -фазы соответствует не только увеличение доли α -мартенсита, но и γ -фазы. Поскольку возрастание доли α -мартенсита при пластической деформации в указанном интервале температур намного меньше, чем снижение количества ε -фазы, то увеличение содержания аустенита, сопровождающееся уменьшением доли ε -фазы, свидетельствует о $\varepsilon \rightarrow \gamma$ переходе [27]. Обычно при ХПД протекание $\gamma \rightarrow \alpha''$ превращения наряду с $\varepsilon \rightarrow \gamma$ маскирует последнее, т. к. не удается зафиксировать увеличение количества аустенита. Именно поэтому общепринято считать, что при деформации мартенситные превращения протекают в следующей последовательности: $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha''$. Аустенит может превращаться в α'' - мартенсит, если температура деформации расположена ниже $M_d^{\gamma \rightarrow \alpha''}$, независимо от того образуется ε - фаза или нет. Это обычно не принимается во внимание. Между тем, $\varepsilon \rightarrow \gamma$ превращение при деформации должно быть даже более предпочтительно, чем $\varepsilon \rightarrow \alpha''$, на развитие которого указывается во многих работах. В ε -фазе есть дефекты упаковки ГЦК, облегчающие ее переход в аустенит [11]. При деформации интервал $\varepsilon \rightarrow \gamma$ превращения в высокомарганцевых сталях, находящийся при относительно невысоких температурах (150–250 °С), понижается [29]. В свою очередь, ХПД вызывает повышение температуры микрообъемов металла до уровня, когда обратное превращение уже может протекать при нагреве. Поскольку деформация при одних условиях вызывает образование ε - фазы, а при других - ее переход в аустенит, была изучена возможность использования $\gamma \leftrightarrow \varepsilon$ переходов, осуществляемых непосредственно в процессе пластической деформации, для повышения механических свойств Fe-Mn сплавов. Деформацию осуществляли по различным схемам. Наилучший результат на стали 06Г16 получен в том случае, когда вначале деформацией при температурах выше $A_d^{\varepsilon \rightarrow \gamma}$ ε - фазу переводили в аустенит, а затем деформацией ниже $M_d^{\gamma \rightarrow \varepsilon}$ упрочняли его и вызывали образование небольшого количества ε - фазы. Основное развитие $\gamma \leftrightarrow \varepsilon$ превращения получают при последующем нагружении в процессе испытаний механических свойств. Деформация со степенями 50 % при 200 °С повышает пределы текучести и прочности, соответственно, в 1,6 и 1,2 раза по сравнению с закаленным состоянием ($\sigma_{0,2} = 420$ МПа, $\sigma_b = 854$ МПа), а относительное удлинение ($\delta = 35$ %) примерно на 10 % выше. ХПД на 10 %, проведенная после этого (рис. 1д), еще больше увеличивает прочностные свойства ($\sigma_{0,2} = 874$ МПа, $\sigma_b = 1200$ МПа), поскольку воз-

растает количество ε - и α'' - фаз, а также плотность дислокаций, но сохраняет пластичность на достаточном уровне ($\delta = 17$ %, $\psi = 35$ %). Это обусловлено тем, что в процессе испытаний механических свойств происходит не только дополнительное упрочнение, но и релаксация микронапряжений.

Наиболее сильно стабилизирует аустенит в двухфазных ($\varepsilon + \gamma$) сталях по отношению к образованию ε - мартенсита при охлаждении теплая деформация при 400 °С. Ее проведение при более высоких температурах (600–800 °С) уменьшает эффект стабилизации, так как наряду с деформационным упрочнением аустенита протекают процессы, снижающие его наклеп.

Деформация стали 06Г20 при 400 °С на 10, 20 и 30 % стабилизирует аустенит и уменьшает количество ε - фазы в структуре с 55 (после закалки) до 35, 12 и 0 %, соответственно. С увеличением степени предварительной деформации при 400 °С предел прочности стали 06Г20 возрастает с $\sigma_b = 710$ МПа (после закалки) до $\sigma_b = 960$ МПа после ХПД со степенью $\varepsilon = 30$ %. Предел текучести при деформации до $\varepsilon = 20$ % меняется мало по сравнению с его уровнем после закалки и возрастает на 90–100 МПа после деформации на 30 %. Важно подчеркнуть, что относительное удлинение при увеличении степени теплой деформации до 20 % достигает максимума ($\delta = 56$ –60 %). При дальнейшем возрастании степени деформации до 30 % оно снижается и незначительно отличается от уровня, полученного после закалки ($\delta = 20$ –25 %). Сопоставление изменения пластичности стали 06Г20, подвергнутой предварительной теплой деформации при 400 °С, и развития в ней мартенситных превращений при последующем нагружении, позволяет заключить, что для получения наибольшей пластичности необходимо, чтобы при испытании механических свойств образование мартенситных фаз происходило бы с оптимальной интенсивностью [29]. В этом случае наряду с упрочнением в стали протекают релаксационные процессы, уменьшающие возможность образования микротрещин. Слишком интенсивное образование мартенситных фаз при нагружении, так же как и недостаточное развитие фазовых превращений, не позволяет реализовать запас пластичности.

Хороший комплекс механических свойств в стали 06Г20 может быть получен, как и в предыдущих случаях, после теплой деформации и дополнительной ХПД. Деформация при 400 °С на 20 % и последующая ХПД такой же степени позволяют получить механические свойства: $\sigma_{0,2} = 890$ МПа, $\sigma_b = 1040$ МПа, $\delta = 18$ %. Чем выше степень предварительной теплой деформации, тем более высокий уровень прочностных свойств может быть получен после одной и той же степени окончательной ХПД. Последнюю следует выбирать с учетом величины предварительного упрочнения и, соответственно, степени стабильности аустенита. Комбинированная обработка стали 06Г20, включающая предварительную деформацию при 400 °С на 30 %, и последующую ХПД на 20 %

(рис. 1e) забезпечують: $\sigma_{0,2} = 960$ МПа, $\sigma_b = 1160$ МПа, $\delta = 18$ %. Такі властивості не можуть бути досягнуті в цій сталі після звичайно застосовуваної ХПД [30]. Краще поєднання механічних властивостей в сталях з структурою $\varepsilon + \gamma$ можна отримати комбінованою обробкою, включаючою попередню і заключительну ХПД з проміжним нагрівом, забезпечуючим завершення $\varepsilon \rightarrow \gamma$ перетворення. Встановлено, що ХПД з наступним нагрівом до 400 °С, в результаті якого відбувається завершення $\varepsilon \rightarrow \gamma$ перетворення викликає стабілізацію аустеніта по відношенню до деформаційного $\gamma \rightarrow \varepsilon$ перетворення і не викликає суттєвого впливу на $\gamma \rightarrow \alpha''$. Чим більше ступінь попередньої ХПД, тим менше кількість ε - фази утворюється після нагріву на 400 °С при охолодженні. ХПД і нагрів на 400 °С забезпечують більш високий рівень міцнісних властивостей, ніж закалка, зберігаючи достатню пластичність. В табл. 2 наведено дані для сталей 07Г22 і 07Г24, підвергнутих різній обробці.

Найкраще поєднання механічних властивостей досягається після двократною ХПД на 20 % з проміжним нагрівом на 400 °С (рис. 1ж). Виявлено, що поєднання багаторазової деформації (~ 5 %) при кімнатній температурі з проміжними короткими нагрівом до 400 °С суттєво підвищує пластичність. Сумарне подовження зразків сталі 07Г22 досягає 90 %.

Таблиця 2 – Вплив ХПД і нагріву на 400 °С на механічні властивості сталей 06Г22 (числитель) і 06Г24 (знаменатель)

Обробка	Механічні властивості		
	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %
1. Закалка від 900 °С	336/230	756/714	27/45
2. Те ж, що і 1 + ХПД 20 %	726/664	954/926	11/17
3. Те ж, що і 2 + нагрів на 400 °С, 1 ч	450/400	916/855	24/34
4. Те ж, що і 3 + ХПД на 20 %	920/870	1160/1060	15/23
5. Те ж, що і 4 + отпуск 250 °С, 1 ч	985/920	1190/1100	18/25

Значне підвищення міцнісних властивостей двохфазних ($\varepsilon + \gamma$) сталей при збереженні у них достатньої пластичності може бути досягнуто дифференційною обробкою, включаючою в поєднанні загального і локального впливу на сплав. В результаті такого впливу в його різних частинах відбуваються неоднакові фазові і структурні перетворення. Внаслідок цього в матеріалі виникають градієнти структурно-фазового стану.

Вивчалась можливість застосування дифференційної обробки для сталі 06Г22, маючої після закалки від 900 °С в структурі 55 % ε - і 45 % γ - фаз. Плоскі зразки товщиною 2 мм локально деформували з обжаттям 30 % в профілюваних

валках при 400 °С ($M_d = 200$ °С). Чередуються виступи і впадини шириною 1,5 мм розташовані вздовж зразка. Як уже відзначалося, деформація при 400 °С стабілізує аустеніт по відношенню до утворення ε - фази при охолодженні. В результаті локальної теплої деформації в сталі були отримані ділянки аустеніта, являючого метастабільним і претерпеваючого при навантаженні $\gamma \rightarrow \varepsilon$ і $\gamma \rightarrow \alpha''$ перетворення. В недеформованих ділянках структура залишається двофазною з приблизно рівним кількістю ε - і γ - фаз. Для збільшення кількості ε - фази до 80–85 % в цих ділянках проводили ХПД з невеликими ступенями обжаття (~ 10 %), рис. 1з. В результаті отримані наступні властивості: $\sigma_{0,2} = 670$ МПа, $\sigma_b = 950$ МПа, $\delta = 28$ %. Міцнісні характеристики сталі 07Г22 після дифференційної обробки значно вище, ніж після закалки, тоді як відносне подовження приблизно таке ж. Аналогічні результати отримані і в тому випадку, коли спочатку проводили загальну деформацію при 400 °С, а потім локальну – при кімнатній температурі (рис. 1и).

Краще поєднання властивостей в марганцевих сталях типу 07Г22 можна отримати після дифференційної обробки, включаючої загальну ХПД і локальну лазерну обробку (рис. 1к). Вона викликає зворотні $\alpha'' \rightarrow \gamma$ або $\varepsilon \rightarrow \gamma$ перетворення, збільшуючи кількість аустеніта в заданих ділянках, розташованих через 1,5–2 мм вздовж зразків товщиною 2 мм, а також обробок, включаючих загальну теплу деформацію при 400 °С і локальну лазерну обробку ($\sigma_{0,2} = 590$ –640 МПа, $\sigma_b = 930$ –980 МПа, $\delta = 23$ –27 %). В відмінності від попереднього випадку, в стабілізованому аустеніті під впливом напружень, викликаних лазерною обробкою, кількість мартенітних (ε - і α'' -) фаз зростає.

Аналогічний ефект отримано в сталі 100Г6Ф. Після закалки з 1100 °С в воді вона має переважно аустенітну структуру. Локальна лазерна термообробка, створюючи упрочнені і не упрочнені ділянки, чередуються з кроком 2 мм, дозволяє в оброблених ділянках підвищити твердість з 28 HRC до 52 HRC. Останнє викликане утворенням великої кількості α - мартеніта, що обумовлено високим рівнем напружень при лазерній обробці, приводящих до розпаду метастабільного аустеніта. Испитання при сухому терті по схемі колодка – ролик показали, що зносостійкість підвищилася в 1,5 рази порівняно з її рівнем після закалки з 1100 °С.

Ефективність комбінованих обробок, передбачаючих отримання підвищеної кількості метастабільного аустеніта, показана також на низколегованих сталях. Сталь 18ХГТ була цементована при 950 °С (6 ч), закалена без підстигання в масло і отпущена при 180 °С 1 ч. В результаті кількість метастабільного аустеніта в поверхневому шарі становить ~ 80 %, решта – мартеніт отпусків і карбиди. Заключительною обра-

боткой являлась деформация дробью (рис. 1л). Количество метастабильного аустенита уменьшилось до 45 % за счет образования мартенсита деформации. После испытаний на износ, проведенных по схеме ролик – ролик, количество метастабильного аустенита уменьшилось до 18 % за счет $\gamma \rightarrow \alpha''$ превращения при изнашивании. Относительная износостойкость возросла в 1,5 раза по сравнению с уровнем, достигаемым после стандартной обработки, обеспечивающей структуру отпущенного мартенсита и карбидов.

Комбинированная обработка стали 60С2А, обеспечивающая получение повышенного количества метастабильного аустенита и последующее его упрочнение, заключалась в следующем. Сталь нагревали в МКИТ на 780 °С, выдерживали 60 мин, проводили аустенитизацию при 900 °С 4 мин, после чего охлаждали в соляной ванне при 350 °С 10 мин, а затем – на воздухе. В структуре наряду с нижним бейнитом и мартенситом содержалось 28 % остаточного метастабильного аустенита. При этом получены механические свойства: $\sigma_{0,2} = 785$ МПа, $\sigma_b = 1050$ МПа, $\delta = 33$ %. Последующими обработками являлись ХПД ($\varepsilon = 7$ %) и отпуск при 250 °С 1 ч (рис. 1м). В результате упрочнения и частичного превращения остаточного аустенита в мартенсит деформации прочностные характеристики возросли до $\sigma_{0,2} = 990$ МПа, $\sigma_b = 1200$ МПа, а относительное удлинение осталось на достаточно высоком уровне ($\delta = 17$ %). Последнее может быть объяснено развитием при испытании механических свойств деформационного мартенситного превращения.

Целесообразность применения комбинированной обработки с использованием предложенного принципа показана на инструментальной стали 9ХС. Она была закалена с 930 °С в соляной ванне с температуры 300 °С и выдержана в ней 30 мин, после чего охлаждена на воздухе и отпущена при 180 °С 1 ч. В результате этой термообработки наряду с нижним бейнитом в структуре присутствовало 30 % остаточного аустенита. Окончательной обработкой являлась пластическая деформация обкаткой роликом. В результате количество остаточного аустенита уменьшилось в поверхностном слое до 10–15 % за счет образования мартенсита деформации. Твердость при этом возросла с 55 до 62 HRC. Износостойкость, определенная по схеме колодка – ролик, увеличилась в 1,4 раза по сравнению с таковой после стандартной обработки, обеспечивающей структуру отпущенного мартенсита и карбидов.

Приведенные результаты исследований позволяют полагать, что комбинированные обработки, основанные на принципе, заключающемся в получении у них перед упрочняющими обработками повышенного количества метастабильного аустенита, сохранив после них его часть, способную претерпевать ДДМП, могут быть эффективны для повышения свойств многих применяемых сплавов на железной основе. Не исключено, что некоторые из таких обработок, например с использованием источников высококонцентрированной энергии, могут быть использованы для

повышения износостойкости чугунов, а также некоторых покрытий, наносимых разнообразными способами. В ряде случаев для получения наиболее высокого уровня механических свойств или износостойкости с использованием предложенного принципа целесообразна разработка сплавов, имеющих уже после изготовления повышенное количество метастабильного аустенита.

Выводы

1. При проведении комбинированных обработок использован инновационный принцип, согласно которому обеспечивается получение в структуре сталей наряду с другими составляющими повышенного количества метастабильного аустенита, после чего проводится упрочнение, приводящее к частичному его превращению в мартенсит деформации, но сохраняющее его способность к динамическим мартенситным превращениям при нагружении.

2. Комбинированные обработки сочетают термическое или/и деформационные воздействия на сплав, осуществляемые в различных комбинациях и последовательности. Они могут включать выбор определенного химического состава сплава, закалку с более высокой температуры, чем типовая, нагрев и выдержку в межкритическом интервале температур, изотермическую закалку, химико-термическую обработку, возможно нанесение определенных покрытий на поверхность, теплую, холодную пластическую деформацию, в ряде случаев нагрев после нее, а также использование источников высококонцентрированной энергии.

3. Предложенные комбинированные обработки открывают широкие возможности для повышения механических свойств или износостойкости сплавов различных структурных классов.

4. При выборе схем и режимов комбинированных обработок, необходимо учитывать исходный фазовый состав сталей и превращения, протекающие при различных воздействиях применяемых технологий, а также условия нагружения при испытаниях свойств и эксплуатации.

Список литературы

1. Лякишев Н. П. Новые направления в технологии получения материалов с заданными свойствами / Н. П. Лякишев // *Металлы*. – 1992. – № 2. – С. 5–8.
2. Иванова В. С. Синергизм механических свойств и экстремальных технологий управления структурой металла / В. С. Иванова, В. С. Баланкин, О. А. Банных // *Металлы*. – 1992. – № 2. – С. 11–20.
3. Прусаков Б. А. Проблемы материалов в XXI веке / Б. А. Прусаков // *МиТОМ*. – 2001. – № 1. – С. 3–18.
4. Богачев И. Н. Кавитационное разрушение железистых сплавов. /, Р. И. Минц. – М. : Машгиз, 1959. – 170 с.
5. Богачев И. Н. Повышение кавитационно-эрозионной стойкости деталей машин / И. Н. Богачев, Р. И. Минц. – М. : Машиностроение, 1964. – 143 с.
6. Новые кавитационно-стойкие стали для гидротурбин и их термообработка / И. Н. Богачев, Л. С. Малинов, Р. И. Минц. – М. : НИИИНФОРМ

Тяжмаш, 1967. – 47 с.

7. Богачев И.Н. Гидроабразивная стойкость хромомарганцевых сталей / И. Н. Богачев, Л. С. Малинов, В. П. Коробейников // Энергомашиностроение. – 1967. – № 7. – С. 27–30.

8. Попов В. С. Износостойкость пресс-форм огнеупорного производства / В. С. Попов, Н. Н. Брыков, Н. С. Дмитриенко. – М. : Металлургия, 1971. – 157 с.

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

10. Коршунов Л. Г. Износостойкость и структурные превращения нестабильных аустенитных сталей при трении / Коршунов Л. Г. // Контактная прочность неметаллических сплавов. – Свердловск : УПИ, 1972. – С. 72–86.

11. Богачев И. Н. Структура и свойства железомарганцевых сплавов. / И. Н. Богачев, В. Ф. Еголаев – М. : Металлургия, 1973. – 295 с.

12. The Enhancement of Ductility in High – Strength Steels / V.F. Zackay, E.R. Parker, D. Fahr., R. Bush // Trans. ASM. – 1969. – V. 60. – N 1. – P. 252–259.

13. Малинов Л. С. Упрочнение нестабильных Ст-Mn-N сталей / Л. С. Малинов, Т. Д. Эйсмонтд // Известия АН СССР. Металлы. – 1969. – № 2. – С. 113–120.

14. Малинов Л. С. Влияние предварительной пластической деформации на кавитационную стойкость хромомарганцевых сталей / Л. С. Малинов, Т. Д. Эйсмонтд // ФХММ. – 1968. – № 6. – С. 691–692.

15. Малинов Л. С. Влияние мартенсита деформации на свойства сталей Fe-Cr-Mn / Л. С. Малинов, А. П. Чейлях, К. Н. Соколов // Известия АН СССР. Металлы. – 1988. – № 2. – С. 78–83.

16. Малинов Л. С. Кинетика образования ε- фазы в легированных железо-марганцевых сплавах : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 15.16.01 / Л. С. Малинов – Свердловск : Урал. политехн. Ин-т, 1963. – 20 с.

17. Богачев И. Н. Релаксация напряжений в хромомарганцевой аустенитной стали 30Х10Г10 / Богачев И. Н., Потехин Б. А. //ФММ. – 1964. – Т. 18. – № 5. – С. 257–259.

18. Малинов Л. С. Аналогия некоторых принципов, лежащих в основе адаптации живых организмов и сплавов с метастабильным аустенитом, в которых реализуется эффект самозакалки при нагружении, а также разработка технологий на этой основе / Л. С. Малинов // Строительство, материаловедение, архитектура. Дн-ск : ПГСА. – 2002. – Вып. 15. – Ч. 1. – С. 79–83.

19. Малинов Л. С. Стали и чугуны с метастабильным аустенитом – разновидности адаптационных материалов с самоорганизацией структуры, вызванной внешним воздействием / Л. С. Малинов // Тез. докл. X Региональной научн. и научн.-техн. конф. – Мариуполь: ПГТУ. – 2003. – 84 с.

20. Малинов Л. С. Стали и чугуны с метастабильным аустенитом и эффектом самозакалки при нагружении – разновидности адаптационных мате-

риалов, повышающих свои свойства при внешнем воздействии за счет самоорганизации структуры / Л. С. Малинов // Металл и литье Украины. – 2003. – № 11–12. – С. 3–8.

21. Малинов Л. С. Разработка экономнолегированных высокопрочных сталей и способов упрочнения с использованием принципа регулирования мартенситных превращений : автореф. дис. ... д-ра. техн. наук : 15.16.01 / Л. С. Малинов // Екатеринбург: Урал. политехн. ин-т, 1992. – 35 с.

22. Малинов Л. С. Использование принципа получения метастабильного аустенита, регулирования его количества и стабильности при разработке экономнолегированных сплавов и упрочняющих обработок / Л. С. Малинов // МиТОМ. – 1996. – № 2. – С. 35–39.

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

24. Малинов Л. С. Повышение свойств сталей и высокопрочного чугуна получением в их структуре метастабильного аустенита и реализации эффекта самозакалки при нагружении / Л. С. Малинов // Металлы. – 1999. – № 6. – С. 67–76.

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

26. Малинов Л. С. Ресурсосбережение за счет применения экономнолегированных сплавов и упрочняющих технологий, обеспечивающих получение многофазных структур с метастабильным аустенитом и управление структурными и фазовыми превращениями / Л. С. Малинов, В. Л. Малинов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. – № 1. – С. 93–105.

27. Малинов Л. С. Спосіб обробки сталей. Патент України UA № 12399А, С21Д 1/00 / Л. С. Малинов. – № 95010267 ; заявл. 02.12. 1996 ; опубл. 28.02. 1997. – Бюл. № 1.

28. Упрочнение низкоуглеродистой высокопрочной стали в межкритическом интервале температур / И. Ю. Пышминцев, В. А. Корзников, Р. З. Валиев, В. А. Хотинев // МиТОМ. – 1999. – № 5. – С. 11–15.

29. Малинов Л. С. Фазовые превращения при деформации в высокомарганцевом сплаве / Л. С. Малинов, Е. Я. Харланова, Л. А. Голубович // МиТОМ. – 1976. – № 2. – С. – 13–15.

30. Лысак Л. И. Физические основы термической обработки стали / Л. И. Лысак, Б. И. Николин. – К. : Техника. – 1975. – 304 с.

31. Фазовые превращения при нагружении и механические свойства предварительно деформированной стали Г20 / Л. С. Малинов, К. Н. Соколов, Н. Я. Казачкова, Е. Я. Харланова. // Изв. Вузов. Черн. металлургия. – 1973. – № 9. – С. 138–141.

Одержано 28.10.2021

Малінов Л. С., Малінов В. Л., Бутова Д. В. Підвищення властивостей сталей отриманням у їх структурі поряд з іншими складовими метастабільного аустеніту і подальшої зміцненого

Актуальність роботи. Підвищення механічних властивостей сталей і їх зносостійкості дозволяє збільшити експлуатаційну стійкість деталей машин, що є важливим завданням матеріалознавства. Одним з перспективних напрямків в її вирішенні є технології комбінованої обробки, засновані на принципі отримання у них різноманітними способами структури, що містить поряд з іншими складовими (мартенситом різних типів, нижнім бейнітом, в ряді випадків карбідами) підвищеної кількості ($\geq 25\%$) метастабільного аустеніту, і подальшим зміцненням. При цьому деяка кількість аустеніту перетворюється в мартенсит деформації, а збережена частина зазнає динамічне деформаційне мартенситне перетворення (ДДМП) – ефект самозакалки при навантаженні (СЗН). Комбіновані технології обробки включають термічне (в ряді випадків хіміко-термічне) і деформаційні впливи на метал, що здійснювані в різних поєднаннях і послідовності. Технології обробки для отримання в структурі сталей підвищеної кількості метастабільного аустеніту можуть включати: витримку в межкритическом інтервалі температур (МКІТ) при різних способах гарту, пластичну деформацію, стабілізуючу аустенит по відношенню до утворення мартенситу охолодження, термоциклювання та ін. Зміцнення сталей, що мають в структурі підвищену кількість метастабільного аустеніту, здійснюється холодною пластичною деформацією, після якої в ряді випадків проводиться відпуск, а також обробками з використанням джерел концентрованої енергії (лазерна, електронно-променева). Однак, в даний час принцип, що розглядається, і технології комбінованої обробки, що його реалізують, не застосовуються в промисловості. Це виключає використання метастабільного аустеніту, що є внутрішнім ресурсом самого матеріалу, і його трансформацію при навантаженні, що підвищує його здатність до самозахисту від руйнування в процесі випробувань властивостей і експлуатації. У зв'язку з цим доцільним є впровадження в практику запропонованих технологій комбінованої обробки, що забезпечить ресурсозбереження. В роботі на ряді сталей показана їх ефективність.

Мета роботи – показати можливість підвищення у досліджених сталей механічних властивостей або зносостійкості застосуванням технологій комбінованої обробки, заснованих на принципі, що передбачає отримання в їх структурі підвищеної кількості метастабільного аустеніту і подальше зміцнення, що зберігає можливість ДДМП і реалізацію ефекту СЗН.

Методи дослідження. Застосовувалися дюриметричний, металографічний і рентгенівський методи дослідження. Визначалися механічні властивості при розтягуванні і ударна в'язкість, а також зносостійкість. Ці властивості порівнювалися з отриманими у досліджуваних сталей після типовий термообробки.

Результати. Показано, що запропоновані технології комбінованої обробки, що включають отримання в структурі досліджених сталей підвищеної кількості метастабільного аустеніту і подальше зміцнення, що зберігає можливість ДДМП і реалізацію ефекту СЗН підвищують механічні властивості або зносостійкість в порівнянні з їх рівнем після обробки, яка застосовується зазвичай.

Наукова новизна. Для підвищення механічних властивостей або зносостійкості сплавів запропонований інноваційний принцип, який полягає в отриманні у них перед зміцнюючими обробками підвищеної кількості метастабільного аустеніту, зберігши після них його частину, що здатна зазнавати ДДМП і, відповідно, реалізувати ефект СЗН при випробуванні властивостей і експлуатації.

Практична цінність. Для досліджених сталей визначені раціональні режими технологій комбінованої обробки, що включають отримання в їх структурі підвищеної кількості метастабільного аустеніту і подальше зміцнення, які показали свою ефективність в підвищенні механічних властивостей або зносостійкості в порівнянні з обробками, які застосовуються звичай.

Ключові слова: гарт, деформація мартенсит, нижній бейніт, карбіди, метастабільний аустеніт, самозагартування при навантаженні, механічні властивості, зносостійкість.

Malinov L., Malinov V., Burova D. Improving the properties of steels by producing in their structure along with other components of metastable austenite and the following hardening

The relevance. Improving the mechanical properties of steels and their wear resistance makes it possible to increase the service life of machine parts, which is an important task of materials science. One of the promising directions in its solution is combined processing technologies of steels based on the principle of obtaining in them in various ways a structure containing, along with other components (various types of martensite, lower bainite, in some cases carbides) of an increased amount ($\geq 25\%$) of metastable austenite, and subsequent strengthening. In this case, a certain amount of austenite transforms into deformation martensite, and the its remaining part undergoes dynamic deformation martensitic transformation (DDMT) – the effect of self-hardening under loading (SHL). Combined processing technologies include thermal (in some cases, chemical-thermal) and deformation effects on the metal, carried out in various combinations and sequences. Processing technologies for obtaining an increased amount of metastable austenite in the structure of steels can include: holding in the intercritical temperature interval (ICTI) with various hardening methods, plastic deformation stabilizing austenite with respect to the formation of cooling martensite, thermal cycling, etc. Strengthening of steels with an increased amount of metastable austenite is carried out

by cold plastic deformation, after which tempering is carried out in some cases. However, the principle is currently being considered and the combined processing technologies that implement it are not used in industry. This excludes the use of metastable austenite, which is an internal resource of the material itself, and its transformation under loading, which increases its ability to self-defense against destruction during testing of properties and operation. In this regard, it is advisable to introduce the proposed combined processing technologies into practice, which will ensure resource saving. In work on a number of steels their effectiveness has been shown.

Purpose is to show the possibility of increasing the mechanical properties or wear resistance of the studied steels by using combined processing technologies based on the principle that provides for the production of an increased amount of metastable austenite in their structure and subsequent hardening, which preserves the possibility of DDMT and the implementation of the effect SHL.

Research methods. Durometric, metallographic and X-ray research methods were used. The tensile properties and impact strength, as well as abrasive wear resistance, were determined. These properties were compared with those obtained for the studied steels after a typical heat treatment.

Results. It is shown that the proposed combined treatment technologies, including the production of an increased amount of metastable austenite in the structure of the studied steels and subsequent hardening, which retains the possibility of DDMT and the implementation of the effect SHL, increase the mechanical properties or wear resistance in comparison with their level after the commonly used treatment.

Scientific novelty. To improve the mechanical properties or wear resistance of alloys an innovative principle was proposed, which consists in obtaining in them an increased amount of metastable austenite before strengthening treatments, preserving after them a part of it that can undergo DDMT and, accordingly, realize the effect SHL when testing properties and operation.

Practical value. For the studied steels, rational modes of combined processing technologies have been determined, including obtaining an increased amount of metastable austenite in their structure and subsequent hardening, which have shown their effectiveness in increasing mechanical properties or wear resistance in comparison with commonly used treatments.

Key words: quenching, martensite of deformation, lower bainite, carbides, metastable austenite, self-hardening under loading, mechanical properties, wear resistance.