

УДК 669.15'.74.-194-15.669.17

Перспективные технологии обработки, создающие микро- и макронеоднородную многофазную структуру с метастабильным аустенитом для повышения свойств

Малинов Леонид Соломонович

leonid.s.malinov@gmail.com

Малинов Владимир Леонидович

malinov.v.l@yandex.ru

Лаврова Елена Владимировна

lhelen22@yandex.ru

Цыс Елена Александровна

tskatrin88@yandex.ru

ПГТУ — филиал НИУ МГСУ, Мариуполь, Донецкая Народная Республика, Россия

Аннотация. Приведены результаты работ по повышению свойств сплавов на железной основе применением технологий получения у них микро- и макронеоднородной многофазной структуры с метастабильным аустенитом, претерпевающим динамическое деформационное мартенситное превращение-ДДМП (эффект самозакалки при нагружении — СЗН). Показано, что изотермическая и ступенчатая закалка с охлаждением после аустенитизации и выдержкой при постоянной температуре по схеме вода — печь — воздух при получении макронеоднородной многофазной структуры с метастабильным аустенитом позволяют получить механические свойства у исследованных сталей, не достижимые улучшением. При этом такие технологии термообработки экологичны и экономичны по сравнению с типовыми. Создание регулярной макронеоднородной структуры поверхности (градиентные структурно-фазовые состояния — ГСФС) с различными соотношениями фаз (мартенста, карбидов, боридов, метастабильного остаточного аустенита и др.) позволяет существенно повысить абразивную износостойкость.

Ключевые слова: микро- и макронеоднородная многофазная структура, метастабильный аустенит, эффект самозакалки

Promising Processing Technologies that Create a Micro- and Macrouniform Multiphase Structure with Metastable Austenite to Enhance Properties

Malinov Leonid Solomonovich

leonid.s.malinov@gmail.com

Malinov, Vladimir Leonidovich

malinov.v.l@yandex.ru

Lavrova Elena Vladimirovna

lhelen22@yandex.ru

Tsys Elena Alexandrovna

tskatrin88@yandex.ru

PSTU — branch of the Moscow State University of Civil Engineering,
Mariupol, Donetsk National Republic, Russia

Abstract. The results of work on improving the properties of iron-based alloys by using technologies for obtaining a micro- and macro-heterogeneous multiphase structure with metastable austenite undergoing dynamic deformation martensitic transformation — DDMT (self-hardening effect under loading — SHL) are presented. It is shown that iso-

thermal and stepwise quenching with cooling after austenitization and exposure at a constant temperature according to the water-furnace-air scheme, while obtaining a microuniform multiphase structure with metastable austenite, make it possible to obtain mechanical properties of the studied steels that cannot be achieved by quenching and tempering. At the same time, such heat treatment technologies are environmentally friendly and economical compared to standard ones. The creation of a regular macrouniform surface structure (gradient structural-phase states — HSPS) with different phase ratios (martensite, carbides, borides, metastable residual austenite, etc.) can significantly increase abrasive wear resistance.

Keywords: micro- and macroheterogeneous multiphase structure, metastable austenite, self-hardening effect

Введение. Одним из важнейших направлений современного материаловедения является создание сплавов с метастабильной структурой, способной под влиянием внешних воздействий к самоорганизации [1], что позволяет им иметь свойства существенно более высокие, чем обычно достигаемые в настоящее время. 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 [2].

Большинство исследований, выполненных к настоящему времени, посвящено разработке и изучению высоколегированных сталей и чугунов, имеющих преимущественно структуру метастабильного аустенита. В работе [3] на основании обобщения результатов многочисленных исследований предложено перспективное инновационное направление по получению в сплавах на железной основе многофазной структуры (мартенсит, бейнит, феррит, карбиды, нитриды и другие упрочняющие фазы, а также их разнообразные сочетания), одной из основных составляющих которой является метастабильный аустенит, претерпевающий ДДМП при нагружении.

В конкретных случаях следует получать сочетание лишь некоторых из указанных фаз. Для получения наиболее высокого уровня свойств применительно к условиям нагружения при испытаниях или эксплуатации необходимо управлять структурой и развитием при нагружении мартенситных превращений [3]. При этом важно также использовать сочетание различных известных механизмов упрочнения и сопротивления разрушению (дислокационный, зернограницный, субзеренный и др.). Такой подход существенно расширяет возможность получения метастабильной структуры в нелегированных, низко- и среднелегированных сталях, чугунах и наплавленном металле. Метастабильный аустенит рассматривается как смарт-структура и важнейший внутренний ресурс сплавов. Для получения многофазной микронеоднородной структуры с метастабильным аустенитом предложено, в частности, использовать нагрев под закалку доэвтектоидных сталей различного химического состава в межкритический интервал температур (МКИТ),

в котором происходит перераспределение углерода и легирующих элементов между ферритом, карбидами и аустенитом. Он обогащается аустенитообразующими элементами [4], что необходимо для получения после закалки в структуре сталей наряду с неоднородным по химическому составу мартенситом или бейнитом и карбидами остаточного метастабильного аустенита.

Предложены способы ступенчатого охлаждения при закалке [4], в которых охлаждение до температуры изотермы проводится в воде, а после нее — на воздухе. Выдержка сталей при температуре «ступеньки» осуществляется в печи, после чего следует охлаждение на воздухе. Приведены также результаты исследований в перспективном направлении по созданию в сплавах регулярной макронеоднородной структуры [3] (по современной терминологии макроскопических градиентов структурно-фазового состояния — ГСФС) за счет разработки технологий дифференцированных обработок (ТДО). Они позволяют создавать в материале чередование в заданной последовательности участков с различными механическими и физическими свойствами. Показана целесообразность получения жидкой фазы в упрочняемых ТДО участках сплавов при термодиффузионных процессах для их существенного ускорения, реализации самозакалки из жидкого состояния, увеличения глубины упрочненного слоя и получения многофазной структуры с метастабильным аустенитом. Этим технологиям еще уделяется недостаточное внимание.

Представляет научный и практический интерес создание модели для расчета напряжено-деформированного и структурно-фазового состояния материалов после градиентной обработки высококонцентрированными источниками нагрева (ВКИН). Исходными данными для имитационной модели являются свойства источника нагрева, распространение тепла в материале, эмпирические зависимости изменения структурно-фазового состояния и физико-механических свойств. Картина полей напряжений после градиентной плазменной обработки подразумевает чередование закаленных участков зоны плазменного воздействия (ЗПВ) с неупрочненными зонами [5].

Материалы и методы. Объектом исследования являлись следующие стали 38ХС, 60Х18. Экологичные изотермическую и ступенчатую закалку проводили по новым технологиям [4]. ТДО включали лазерную обработку (ЛО) и электронно-лучевую обработки (ЭЛО) с расплавлением заданных участков. ЛО проводили на установке «Кардамон» с выходной мощностью 800 Вт. Диаметр лазерного пятна составлял 2 мм. Для ЭЛО использовали установку ЭЛУ185. Легирование бором и хромом с одновременным повышением содержания углерода осуществляли применением, соответственно, порошков карбида бора и высокоуглеродистого феррохрома. Диаметр упрочненных участков и расстояние между ними составляли, соответственно 2–3 мм и 5 мм. Их располагали в шахматном порядке. Применяли рентгеновский анализ. Определяли механические свойства, а в ряде случаев — абразивную износостойкость по методу Бринелля — Хауорта. Эталонами сравнения служили образцы тех же сталей в исходном состоянии.

Результаты. Экологичная изотермическая закалка стали 38ХС из МКИТ (780 °С, 30 мин) с охлаждением (до 350 °С) и выдержкой (40 мин) по схеме вода-печь-воздух обеспечила более высокие механические свойства ($\sigma_{0,2} = 990$ МПа, $\sigma_B = 1220$ МПа, $\delta = 21$ %, $\psi = 55$ %, $KCU = 1,0$ МДж/м²), чем улучшение по типовой технологии ($\sigma_{0,2} = 895$ МПа, $\sigma_B = 947$ МПа, $\delta = 12$ %, $\psi = 49$ %, $KCU = 0,8$ МДж/м²). Изотермическая закалка с предварительной выдержкой в МКИТ и последующей кратковременной аустенитизацией на типовую температуру, исключающей образование феррита после термообработки, позволила получить у стали 38ХС наиболее высокий уровень прочностных свойств, повышенную пластичность и ударную вязкость ($\sigma_{0,2} = 1020$ МПа, $\sigma_B = 1270$ МПа, $\delta = 19$ %, $\psi = 53$ %, $KCU = 0,9$ МДж/м²). Ступенчатая закалка стали 60Х18 с 1050 °С с охлаждением в воде до 450 °С, выдержки 60 мин при этой температуре, охлаждение на воздухе получены более высокие механические свойства: ($\sigma_{0,2} = 1578$ МПа, $\sigma_B = 1692$ МПа, $\delta = 13$ %, $\psi = 48$ %, $KCU = 0,4$ МДж/м²), чем после типовой термообработки, включающей закалку с 1050 °С в масло и отпуск при температуре 200 °С ($\sigma_{0,2} = 1389$ МПа, $\sigma_B = 1471$ МПа, $\psi = 8$ %, $\delta = 4$ %, $KCU = 0,2$ МДж/м²).

Рассмотрим создание упрочненных участков ТДО. В упрочняемых малоуглеродистых сталях невысокой твердости, например 20ГЛ, целесообразно механической обработкой (сверлением, фрезерованием и др.) делать углубления заданной формы и размеров, устанавливая вставки или заполняя порошками из износостойких сплавов, в том числе из отходов. С использованием источниками высококонцентрированной энергии следует поводить их расплавление, после чего, реализуется самозакалка из жидкой фазы, существенно повышающая износостойкость. Химический состав расплавляемых участков стали можно варьировать изменением концентрации углерода и легирующих элементов у них. Это можно также реализовать предварительным нанесением покрытий соответствующего химического состава или проведением химико-термической обработки (цементации и др.), в том числе с использованием паст. Была применена ТДО, включающая нанесение на заданные участки стали порошков карбида бора и высокоуглеродистого феррохрома с последующим их расплавлением ЭЛО. У стали 30ХМЛ после проведения локального расплавления с использованием ЭЛО и легирования углеродом и бором, углеродом и хромом получены участки повышенной микротвердости. Наиболее высокие ее значения ($H_{0,980} = 13000-15000$ МПа) достигнуты при использовании порошка карбида бора. В локальных участках, обработанных ЭЛО, образовалась многофазная микроструктура, состоящая из мартенсита, остаточного метастабильного аустенита, боридов FeB и Fe₂B. При увеличении тока луча с 10 до 20 мА количество остаточного аустенита возросло с 10 % до 32 %. Глубина участков при использовании электронного луча составляет 1–4 мм (в зависимости от режимов обработки). Создание упрочненных участков за счет образования жидкой фазы и легирования углеродом и бором позволило повысить абразивную износостойкость в 4,2 раза. Специ-

ализированным программным пакетом для моделирования процессов поверхностной обработки ВКИН является Simufact.welding. При моделировании тепловой источник представляется в виде функций объемного тепловыделения. Традиционно представлены два варианта: двойной эллипсоид (функция Голдака) и двойной цилиндр. Первый используется для воздействия сварочной дуги и плазмы, второй — для при лазерной и электронно-лучевой обработках. Калибровка виртуальных источников тепла осуществляется на основе теплового расчета и сравнения ЗПВ с опытными шлифами. Такой подход позволяет получить результаты, хорошо согласующиеся с наблюдаемыми в реальности.

Обсуждение полученных результатов. Более высокий уровень механических свойств после ступенчатого охлаждения сталей 38ХС и 60Х18 обусловлено созданием микронеоднородной многофазной структуры, сочетающей при изотермической закалке из МКИТ нижний бейнит, 15–20 % феррита, небольшое количество карбидов и 20–25 % метастабильного аустенита, претерпевающего ДДМП. Более высокие механические свойства после ступенчатой закалки обусловлены созданием многофазной микронеоднородной структуры, содержащей мартенсит, карбиды и метастабильный аустенит (45 %), большая часть которого превращается в процессе испытаний свойств в мартенсит деформации.

Получение регулярной макронеоднородной структуры (ГСФС) с расплавлением заданных участков и их легированием позволило получить многофазную структуру, состоящую из мартенста, карбидов, боридов и метастабильного остаточного аустенита, и за счет этого существенно повысить абразивную износостойкость. Наиболее высокий ее уровень достигнут при наибольшем количестве остаточного аустенита (42 %) за счет большего прироста мартенсита деформации на изнашиваемой поверхности (18 %).

Заключение. Изотермическая и ступенчатая закалка с охлаждением после аустенитизации и выдержкой при постоянной температуре по схеме вода — печь — воздух при получении микронеоднородной многофазной структуры с метастабильным аустенитом позволяют получить механические свойства у исследованных сталей, не достижимые при типовой термообработке. При этом такие технологии термообработки экологичны и экономичны по сравнению с типовыми. Технологии дифференцированной обработки с использованием высококонцентрированных источников нагрева, создающие на поверхности сплавов градиенты структурно-фазовых состояний с чередованием твердых (закаленных) и мягких участков, обеспечивают ресурс- и энергосбережение. Имитационное моделирование открывает возможность управления градиентами структурно-фазовых состояний для оптимизации структуры, напряжений, а также повышения эксплуатационных свойств деталей машин и инструмента.

Список источников

- [1] Прусаков Б.А. Проблемы материалов в XXI веке (обзор). *Металловедение и термическая обработка металлов*, 2001, № 1, с. 3–5.
- [2] Богачев И.Н., Минц Р.И. *Кавитационное разрушение железоуглеродистых сплавов*. Москва, Машгиз, 1959, 170 с.
- [3] Малинов Л.С. *Разработка экономнолегированных высокопрочных сталей и способов упрочнения с использованием принципа регулирования мартенситных превращений*. Дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 1992, 381 с.
- [4] Малинов Л.С. *Спосіб термообробки*. Патент UA № 79717 C21D1 Україна. 2007, бюл. № 10.
- [5] Лаврова Е.В., Малинов В.Л., Малинов Л.С., Цыс Е.А., Туровник Б.А. Моделирование дифференцированной обработки высококонцентрированным источником нагрева. *Технология машиностроения*, 2025, № 2, с. 14–21. <https://doi.org/10.34641/TM.2025.272.2.007>