



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Структура и свойства термически обработанных среднеуглеродистых сталей, легированных медью

Татьяна Огнева^{1, a, *}, Никита Мартюшев^{2, b}, Ирис Альтпетер^{3, c}, Михаил Сурков^{2, d},
Александр Токарев^{4, e}, Татьяна Крутская^{5, f}

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

³ Институт неразрушающего контроля им. Фраунгофера, Кампус ЕЗ 1, Саарбрюккен, 66123, Германия

⁴ Сибирский государственный университет водного транспорта, ул. Щетинкина, 33, г. Новосибирск, 630099, Россия

⁵ Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, ул. Ленинградская, 113, г. Новосибирск, 630008, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-0081-283X>, ogneva@corp.nstu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>, martjushev@tpu.ru,

^c <https://orcid.org/0000-0002-3006-625X>, irisaltpeter@mail.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-3654-8401>, masur@tpu.ru,

^e <https://orcid.org/0000-0002-2841-3689>, aot51@ngs.ru, ^f <https://orcid.org/0000-0001-8003-4523>, j_krutskaa@rambler.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.78.08

История статьи:

Поступила: 15 марта 2018

Рецензирование: 02 апреля 2018

Принята к печати: 30 апреля 2018

Доступно онлайн: 15 июня 2018

Ключевые слова:

Сталь

Легирование медью

Закалка

Структура

Износостойкость

Наночастицы ε-Si

Финансирование:

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-00230).

АННОТАЦИЯ

Введение. Железоуглеродистые сплавы, легированные медью, считаются возможной альтернативой дорогостоящим бронзам при изготовлении деталей крупногабаритных тяжело нагруженных узлов трения скольжения. Условия работы этих узлов предполагают наличие больших удельных нагрузок. Следовательно, материалы, из которых они изготавливаются, должны обладать высоким комплексом прочностных и триботехнических свойств. Наибольшая прочность железоуглеродистых сталей достигается путем закалки, тем не менее в настоящее время остается открытым вопрос о влиянии меди на структуру и свойства среднеуглеродистых сталей после закалки. **Цель работы:** исследование структуры прочностных и триботехнических свойств литых среднеуглеродистых сталей, легированных медью (0...9 мас. %), после закалки от температур 800, 900, 1000 и 1150 °С и низкого отпуска при 200 °С. **Методы исследования.** Структурные исследования проведены с использованием методов оптической и сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Исследованы механические свойства сплавов после лития и закалки с низким отпуском, оценена твердость материалов по Роквеллу, проведены испытания на износостойкость о закреплённые и нежестко закреплённые частицы абразива. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что с повышением содержания меди в стали уменьшается размер ферритного зерна и возрастает дисперсность перлита. Методом просвечивающей электронной микроскопии изучены нанодисперсные включения ε-фазы меди, формирующиеся в ферритной матрице. Нагрев до 800 °С не обеспечивает возможность для полной закалки сталей, легированных медью. Кроме мартенсита в структуре сплавов присутствуют микрообъемы феррита и перлита. Закалка от 900 °С приводит к формированию полностью мартенситной структуры. Дальнейшее повышение температуры закалки не приводит к качественному изменению структурного состава. Включения медистой фазы преимущественно обладают формой, близкой к сферической. При закалке от 1150 °С в сплаве с 9 % меди включения ε-Si выделяются в виде тонких пленок по бывшим границам аустенитных зерен. Методом ПЭМ установлено, что нагрев под закалку приводит к растворению медных наноразмерных включений. На стадии ускоренного охлаждения медь в виде включений не выделяется. Показано, что легирование медью до 6 мас. % способствует росту триботехнических характеристик среднеуглеродистых сталей. Установлено, что наиболее высоким комплексом механических свойств обладают образцы, закаленные от 900 °С.

Для цитирования: Структура и свойства термически обработанных среднеуглеродистых сталей, легированных медью / Т.С. Огнева, Н.В. Мартюшев, И. Альтпетер, М.А. Сурков, А.О. Токарев, Т.М. Крутская // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2018. – Т. 20, № 2. – С. 130–143. – doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-130-143.

Введение

В некоторых случаях стали, легированные медью, используются как материалы триботехнического назначения и рассматриваются в качестве альтернативы дорогостоящим бронзам [1, 2].

*Адрес для переписки

Огнева Татьяна Сергеевна, к.т.н., доцент

Новосибирский государственный технический университет,

пр. К. Маркса, 20,

630073, г. Новосибирск, Россия

Тел.: 8 (383) 315-29-01, e-mail: ogneva@corp.nstu.ru

Экономически замена бронзы на стали наиболее рациональна при изготовлении деталей крупногабаритных тяжело нагруженных узлов трения скольжения. Условия работы этих узлов предполагают наличие больших удельных нагрузок. Следовательно, материалы, из которых они изготавливаются, должны обладать высоким комплексом прочностных и триботехнических свойств.

Ранее проводились исследования железоуглеродистых сплавов, содержащих медь, в том числе чугунов и заэвтектоидных сталей [3, 4]. Влияние меди на процесс графитизации, а также на триботехнические свойства чугунов описано в работе [5]. При выполнении структурных исследований легированных чугунов методами металлографии и просвечивающей электронной микроскопии было зафиксировано разнообразие форм и размеров частиц ε -фазы. Классификация частиц ε -Cu по размерам, а также условия образования данной фазы описаны при анализе чугунов, легированных медью [3, 5, 6]. Очевидно, что влияние частиц медистой фазы вносит существенный вклад в изменение комплекса прочностных и триботехнических свойств материалов. Отмечается рост твердости чугуна и предела прочности при повышении содержания меди за счет механизмов дислокационного упрочнения [7–12]. В частности, при добавлении даже 1 % меди прирост значений σ_B высокопрочного чугуна может составлять 100...200 МПа [8, 9, 12].

Прочностные характеристики среднеуглеродистых сталей существенно выше, чем чугунов. С этой точки зрения в определенных условиях применение сталей, легированных медью, для изготовления элементов узлов трения скольжения может быть более рациональным, чем использование чугунов.

С целью устранения дефектов структуры сталей после литья и повышения комплекса их механических свойств, как правило, проводится термическая обработка. Одним из наиболее эффективных способов повышения прочностных характеристик сталей является закалка с последующим низким отпуском.

Возможность улучшения триботехнических характеристик железоуглеродистых сплавов отмечается в работах [2, 13–18]. Например, при повышении содержания меди в чугуне до 10 % зафиксирована обратная линейная зависимость

коэффициента трения в паре со сталью от количества легирующего элемента [13]. Тем не менее есть ряд вопросов, ответы на которые в современной литературе не отражены либо представлены крайне ограниченно. Слабо представлены экспериментальные данные о влиянии термической обработки на структуру и свойства сталей с добавками меди. С учетом изложенного цель данной работы заключалась в изучении особенностей влияния закалки и последующего отпуска на структуру и триботехнические характеристики среднеуглеродистых сталей, легированных медью.

Методика исследований

Для проведения экспериментальных исследований были получены стальные отливки с содержанием меди от 0 до 9 мас. % с шагом в 1 %. В качестве шихты использовали сталь 45 и электротехническую медь. Шихту плавил в индукционной печи с кислой футеровкой. Емкость тигля печи составляла 40 кг, масса отливки одного химического состава – 30 кг. Элементный анализ сталей, полученных в ходе экспериментов, был выполнен на оптико-эмиссионном спектрометре ARL-3460.

Закалка стали 45, как правило, проводится с нагревом заготовок до 820...840 °С (выше линии A_3 на диаграмме железо–цементит). В качестве закалочной среды может быть использована вода. В отличие от нелегированных углеродистых сталей в сплавах системы Fe-Cu превращение α -Fe $\leftrightarrow$ γ -Fe происходит при 850 °С. При температуре 1094 °С ε -медь переходит в жидкое состояние. Полное растворение 9 % меди в аустените должно происходить при температуре 1150...1200 °С. Часть этой меди, находящейся в жидком состоянии, диффундирует в аустенит. Для того чтобы оценить характер структурных преобразований, было принято решение проводить закалку образцов от 800, 900, 1000 и 1150 °С. В качестве закалочной среды использовали минеральное масло. С целью снятия напряжений после закалки выполнялся низкий отпуск (200 °С). Размеры образцов под закалку составляли 30 × 25 × 10 мм.

Металлографические исследования материалов были проведены на микроскопе Carl Zeiss Axio Observer Z1m. Исследования структуры

сталей при повышенных увеличениях выполняли на трансмиссионном электронном микроскопе *FEI Tecnai 20 G2 TWIN*. Фазовый анализ полученных сплавов проводили с использованием рентгеновского θ - θ дифрактометра *ARL X'TRA* с геометрией Брэгга-Брентано. Источником рентгеновского излучения была медная рентгеновская трубка. Дифракционные картины регистрировали в пошаговом режиме ($t = 5$ с) с шагом $\Delta 2\theta = 0,05^\circ$.

Твердость полученных в работе отливок измеряли по методу Роквелла в соответствии с ГОСТ 9013 при нагрузке 150 кгс на алмазный индентор. Испытания на износостойкость литых и термически обработанных сталей в условиях трения о нежестко закрепленные частицы абразива проводились в соответствии с ГОСТ 23.208–79. Путь трения в процессе изнашивания составлял 942 м. В качестве абразивного материала использовали речной песок с размером зерен ~ 200 мкм. Частота вращения ролика была рав-

на 60 об/мин, усилие прижатия ролика к образцу составляло 44 Н. Испытания в условиях трения о закрепленные частицы абразива были проведены в соответствии с ГОСТ 17367–71. Образцы для испытаний представляли собой цилиндрические образцы диаметром 2,5 мм. В качестве эталона при определении уровня износостойкости использовалась литая сталь 45.

Результаты и их обсуждение

Металлографические исследования показали, что в литом состоянии нелегированная сталь 45 имеет ферритно-перлитную структуру со средним размером ферритных зерен в поперечном направлении ~ 50 мкм. При повышении содержания меди до 5 мас. % размер зерна был снижен до ~ 30 мкм. Дальнейшее увеличение содержания меди до 9 мас. % не приводило к изменению среднего размера ферритного зерна (рис. 1). Объемная доля феррита в литых образ-

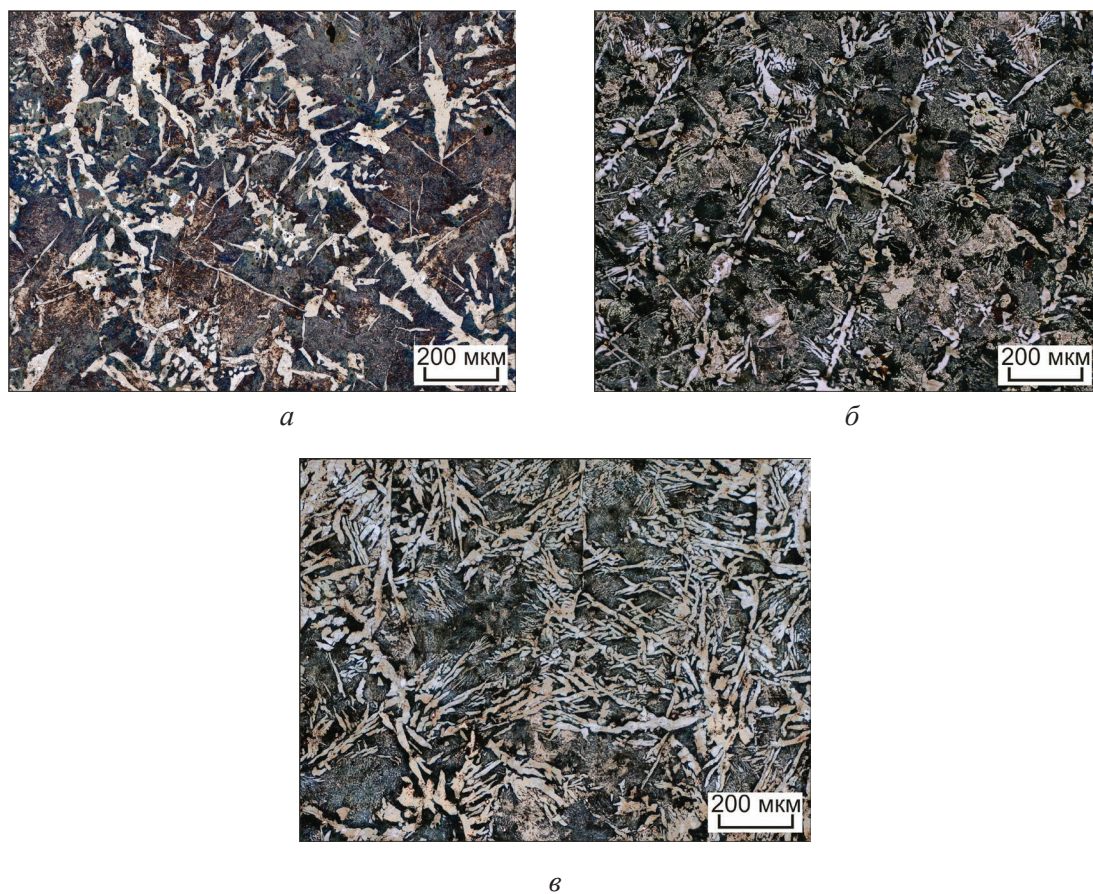


Рис. 1. Структура литой стали 45 с различным содержанием меди:

a – 0 % Cu; b – 5 % Cu; v – 9 % Cu

Fig. 1 Structure of medium-carbon cast-steel with different copper content:

a – 0 wt.% Cu; b – 5 wt.% Cu; v – 9 wt.% Cu

цах составляла ~30 %, при этом ее количество с увеличением содержания меди не изменялось.

Повышение содержания меди в исследуемых сталях сопровождается ростом дисперсности перлита – наблюдается уменьшение межпластинчатого расстояния и толщины цементитных пластин. Возможной причиной отмеченных структурных изменений является увеличение скорости охлаждения сплавов с повышением содержания меди. В свою очередь, изменение скорости охлаждения обусловлено повышением теплопроводности сплава [19]. Объясняется это тем, что теплопроводность меди в 5 раз выше теплопроводности железа [20].

Методом ПЭМ в ферритных зернах и ферритных прослойках перлита легированной медью стали обнаружены частицы ϵ -Cu (3 на рис. 2), некоторые из них расположены на поверхности цементитных пластин.

В ходе структурных исследований термически обработанных образцов было выявлено, что нагрев до 800 °C не обеспечивает полной закалки сталей. Кроме мартенсита в структуре сплавов в больших количествах присутствует феррит и перлит (рис. 3). После закалки с нагревом до 900 °C в структуре стали 45 присутствует мелкокристаллический мартенсит и остаточный аустенит (рис. 4). Повышение температуры нагрева под закалку до 1000 и 1150 °C сопро-

водится укрупнением микрообъемов мартенсита и остаточного аустенита, огрублением этих структурных составляющих (рис. 5 и 6). Увеличение содержания меди приводит к измельчению структурных составляющих в закаленных сталях, как это происходит в литых образцах (рис. 3–6).

Металлографически включения ϵ -Cu были зафиксированы в структуре образцов, содержащих не менее 6 % меди. При более низком содержании меди включения ϵ -Cu металлографически в исследуемых сталях не различимы. В стали с 7 % меди зафиксированы редкие включения медистой фазы округлой формы размером 3...5 мкм. С повышением содержания Cu до 9 % размеры включений увеличиваются до 5...7 мкм. В сталях, закаленных от 800, 900 и 1000 °C, форма частиц ϵ -Cu близка к сферической. После закалки от 1150 °C избыточная медь выделяется в виде тонких пленок. Это означает, что значительная доля меди, перешедшей при 1094 °C в жидкое состояние, была распределена по границам бывших аустенитных зерен. Очевидно, что такое строение материала следует считать неприемлемым, поскольку пленочные выделения ϵ -Cu будут способствовать охрупчиванию стали [23].

Снимки, представленные на рис. 7, характеризуют влияние температуры закалки на строение стали 45, содержащей 3 % Cu. После закалки от 800 °C частицы ϵ -меди находятся в ферритных зернах и в ферритной матрице перлита. В процессе нагрева образцов до 900 °C и выше медь растворяется в аустените. На стадии ускоренного охлаждения атомы Cu переходят в мартенсит.

Результаты просвечивающей электронной микроскопии коррелируют с данными рентгенофазового анализа образцов. На полученных дифрактограммах анализировали рефлексы, соответствующие основным структурным составляющим меди и α -железа. Рис. 8 позволяет оценить фазовый состав образцов, содержащих 9 % меди после литья и закалки с низким отпуском. Закалка от 800 °C сопровождается снижением интенсивности пиков меди, что связано, вероятно, с растворением части медистых включений в кристаллической решетке мартенсита. При увеличении температуры закалки до 1150 °C рефлексы, принадлежащие медистой фазе, едва заметны, что объясняется почти полным исчезновением включений ϵ -Cu.

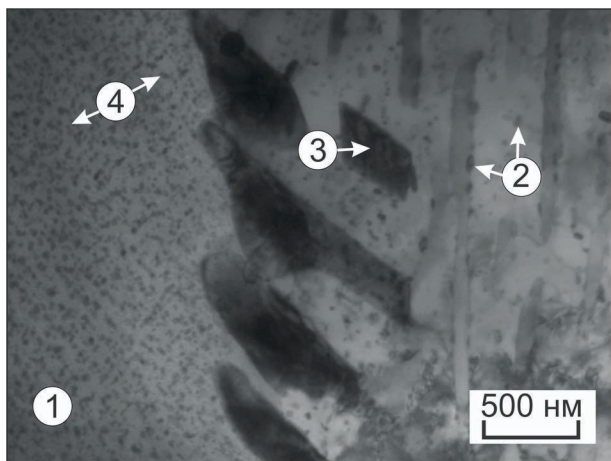


Рис. 2. Просвечивающая электронная микроскопия структуры литой среднеуглеродистой стали, легированной 3 % Cu:

1 – феррит; 2 – перлит; 3 – ϵ -Cu; 4 – Fe_3C

Fig. 2 Transmission electron microscopy of medium-carbon steel, alloyed with 3 wt.% of copper:

1 – ferrite; 2 – perlite; 3 – ϵ -Cu; 4 – Fe_3C

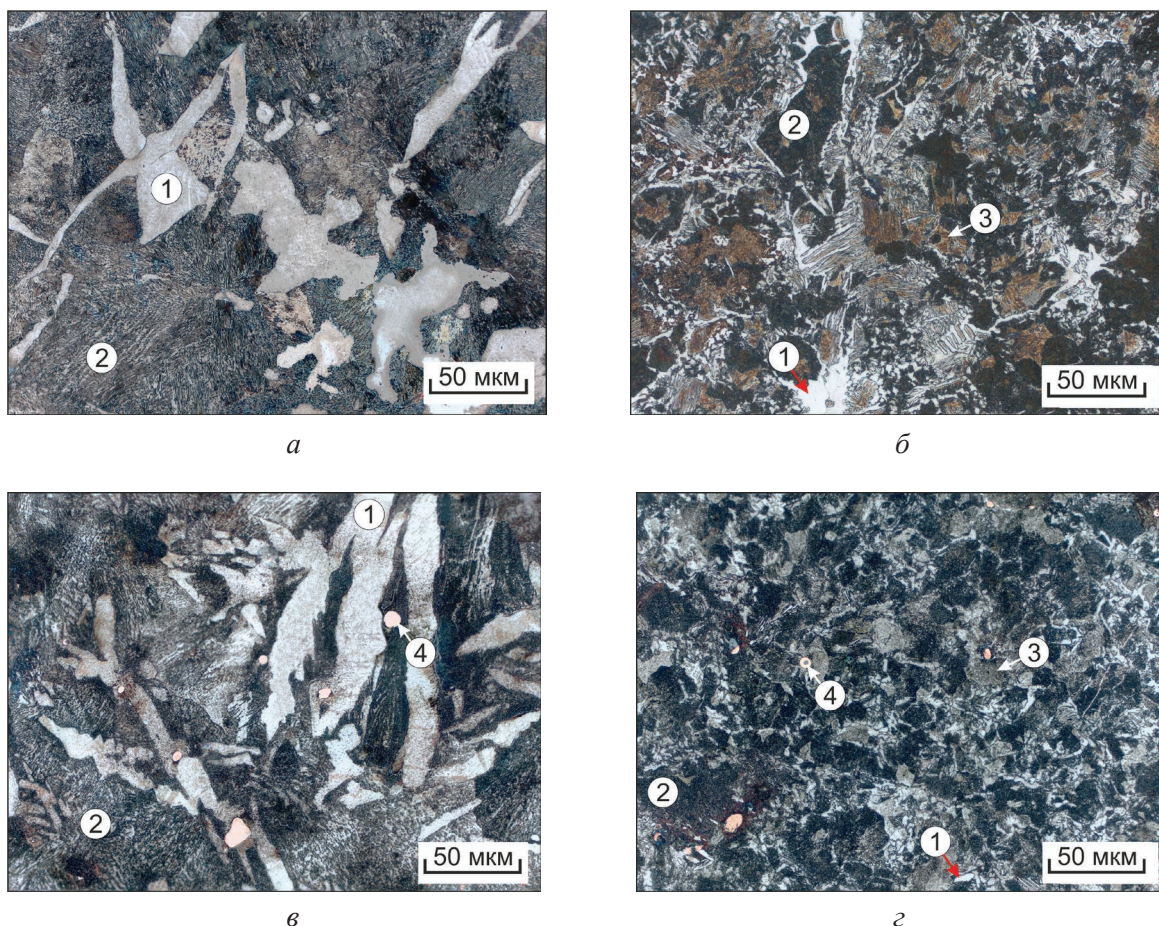


Рис. 3. Структура среднеуглеродистой стали, легированной 0 мас. % (а, б) и 9 мас. % (в, г) меди после литья (а, в) и закалки (б, г) от 800 °С и низкого отпуска:

1 – феррит; 2 – перлит; 3 – участки с закаленной структурой; 4 – ϵ -Cu

Fig. 3. Structure of medium-carbon steel, alloyed with 0 wt.% (а, б) and 9 wt.% (в, г) of copper after casting (а, в) and quenching (б, г) from 800 °C and low tempering:

1 – ferrite; 2 – pearlite; 3 – areas with quenched structure; 4 – ϵ -Cu

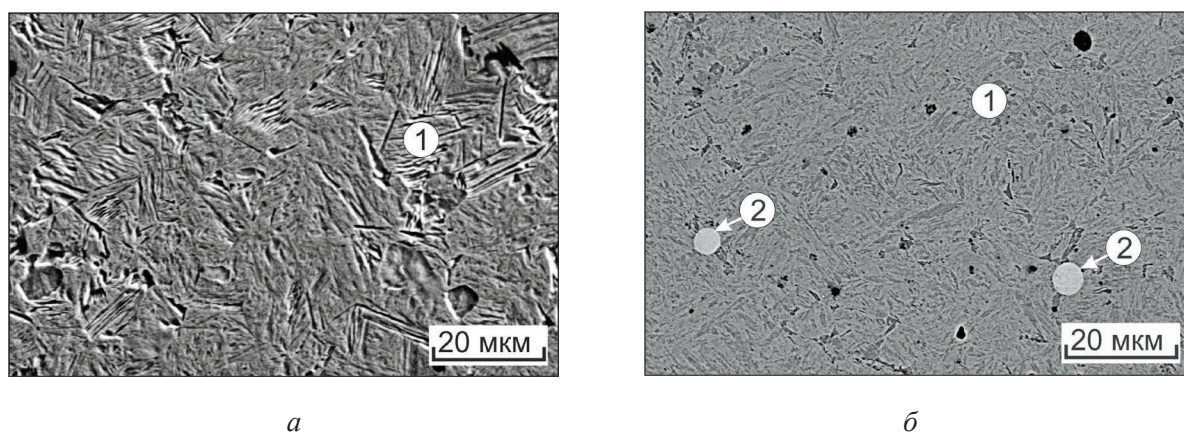


Рис. 4. Структура среднеуглеродистой стали, легированной 0 мас. % (а) и 9 мас. % (б) меди после закалки от 900 °С и низкого отпуска:

1 – структура закаленной стали; 2 – ϵ -Cu

Fig. 4. Structure of medium-carbon steel alloyed with 0 wt.% (а) and 9 wt.% (б) of copper after quenching from 900 °C and low tempering:

1 – structure of quenched steel; 2 – ϵ -Cu

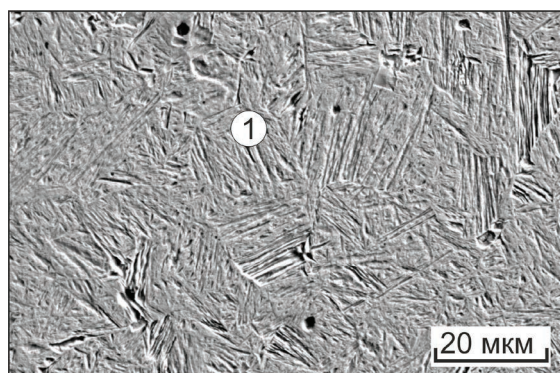
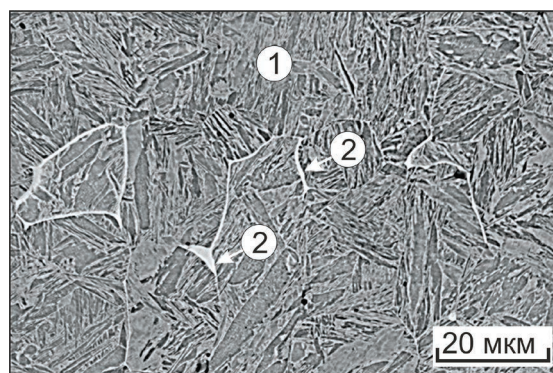
*a**б*

Рис. 5. Структура среднеуглеродистой стали, легированной 0 мас. % (а) и 9 мас. % (б) меди после закалки от 1000 °С и низкого отпуска:

1 – структура закаленной стали; 2 – ϵ -Cu

Fig. 5. Structure of medium-carbon steel, alloyed with 0 wt. % (a) and 9 wt. % (b) of copper after quenching from 1000 °C and low tempering:

1 – structure of quenched steel; 2 – ϵ -Cu

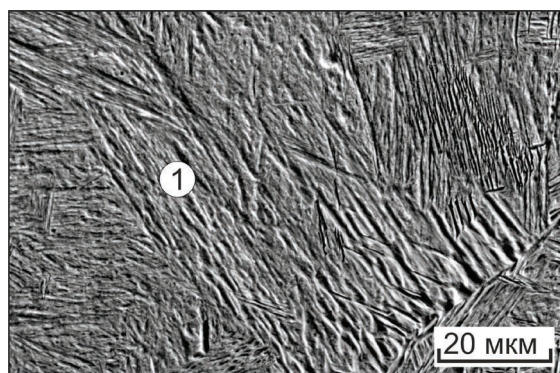
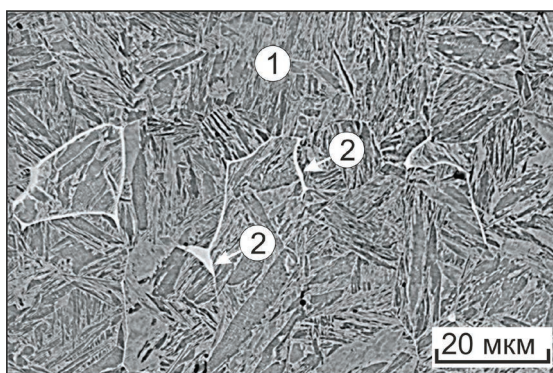
*a**б*

Рис. 6. Структура среднеуглеродистой стали, легированной 0 мас. % (а) и 9 мас. % (б) меди после закалки от 1150 °С и низкого отпуска:

1 – структура закаленной стали; 2 – ϵ -Cu

Fig. 6. Structure of medium-carbon steel alloyed with 0 wt. % (a) and 9 wt. % (b) of copper after quenching from 1150 °C and low tempering:

1 – structure of quenched steel; 2 – ϵ -Cu

Результаты измерения твердости отливок с различным содержанием меди после закалки от 900, 1000 и 1150 °С и низкого отпуска представлены на рис. 9. Максимальный уровень твердости соответствует сталям с 6 % Cu. В зависимости от технологических режимов обработки и структурного состояния возможно проявление двух дислокационных механизмов упрочнения сталей, легированных медью. Один из них связан с выделением наноразмерных частиц ϵ -Cu, второй – с растворением меди в решетке α -железа. При увеличении содержания меди до 6 % роль каждого механизма возрастает. При дальнейшем

увеличении содержания легирующего элемента возможно выделение более крупных частиц медистой фазы, что сопровождается снижением твердости материала. Упрочняющие эффекты, обусловленные введением меди в стали, подробно исследованы в работах [21, 22].

В термически не обработанном состоянии твердость легированных медью сталей не превышает 22 HRC. После полной закалки (от 900, 1000 и 1150 °С) твердость нелегированной стали составляет 46...48 HRC. Максимальный эффект, обусловленный введением в стали 6 % Cu, достигает 60 HRC. Металлографические и рент-

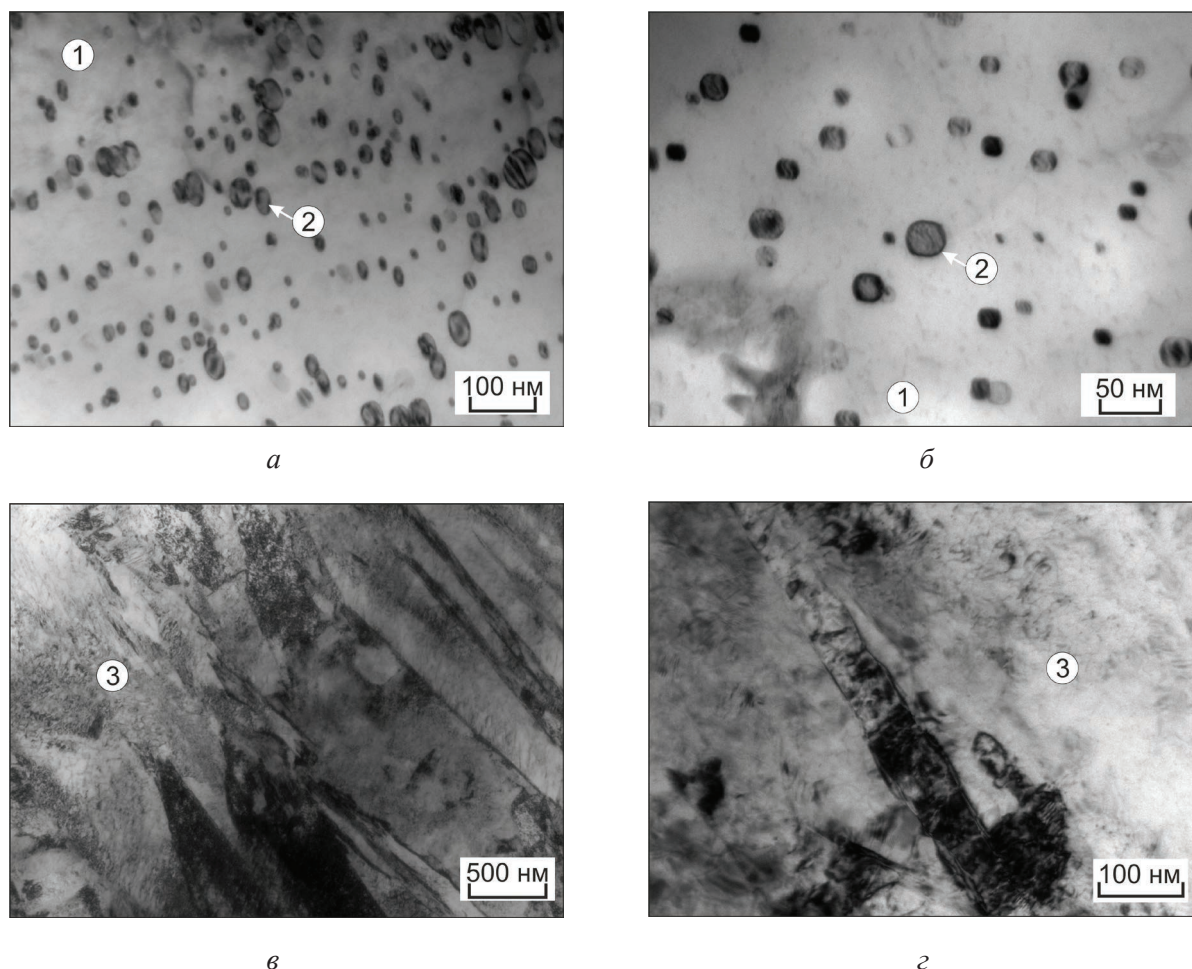


Рис. 7. Тонкое строение среднеуглеродистой стали с 3 мас. % меди, зафиксированное методом просвечивающей электронной микроскопии:

а – после литья; *б* – после закалки от 800 °С и низкого отпуска; *в* – после закалки от 900 °С и низкого отпуска; *г* – после закалки от 1150 °С и низкого отпуска; 1 – феррит; 2 – ϵ -Cu; 3 – мартенсит

Fig. 7. Fine structure of medium-carbon steel with 3 wt.% of copper, transmission electron microscopy:

a – after casting; *b* – after quenching from 800 °C and low tempering; *в* – after quenching from 900 °C and low tempering; *г* – after quenching from 1150 °C and low tempering; 1 – ferrite; 2 – ϵ -Cu; 3 – martensite

геновские исследования показали, что при охлаждении в масле стальных образцов, нагретых до 800 °С, полной закалки не происходит. Этот факт подтверждается также и результатами измерения твердости (рис. 9), согласно которым прирост твердости после закалки от 800 °С существенно меньше по сравнению с полностью закаленными образцами.

Полученные данные коррелируют с результатами триботехнических испытаний материалов. В условиях трения о закрепленные частицы абразива максимальной износостойкостью обладают сплавы, содержащие ~ 6 % Cu (рис. 10). Наиболее ярко этот максимум проявляется при испытаниях образцов, закаленных от 800 °С.

Анализ результатов экспериментальных исследований свидетельствует о зависимости износостойкости сталей от температуры закалки. Наиболее высокий уровень обеспечивает закалка от 900 °С, после которой в образцах формируется структура мелкокристаллического мартенсита.

Результаты испытаний на износостойкость при воздействии незакрепленных частиц абразива свидетельствуют о том, что потеря массы литых термически необработанных сплавов, содержащих 3 и 9 %, приблизительно одинакова (рис. 11). Максимальной износостойкостью обладает сплав с 6 % меди. Закалка в сочетании с низким отпуском благоприятно отражается на свойствах легированных медью сталей. Наи-

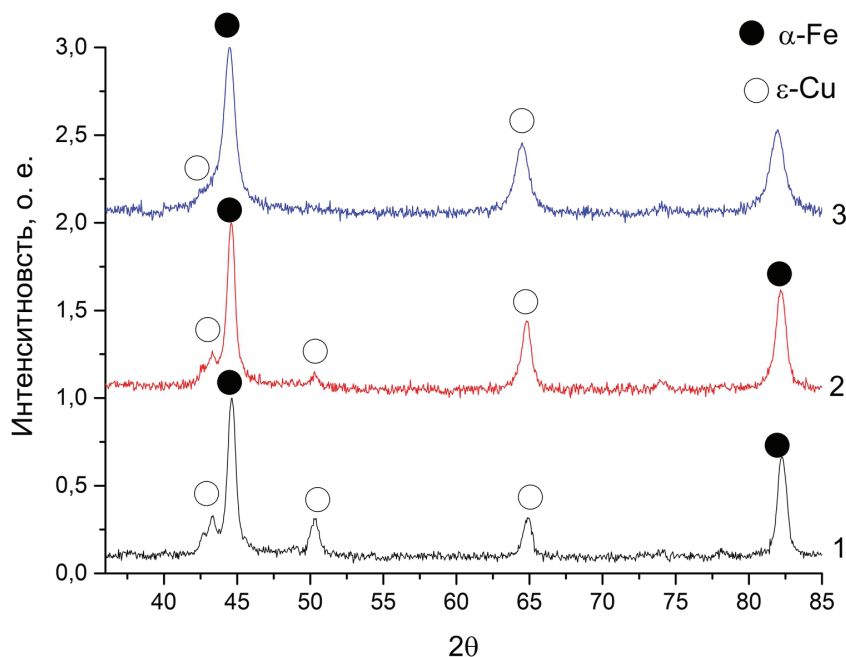


Рис. 8. Результаты рентгенофазового анализа стали 45 с 9 % Cu после литья (1), а также после закалки от 800 (2) и 1150 °C (3)

Fig. 8. Results of X-ray phase analysis of steel 45 with 9 % Cu after casting (1), and after quenching from 800 (2) and 1150 °C (3)

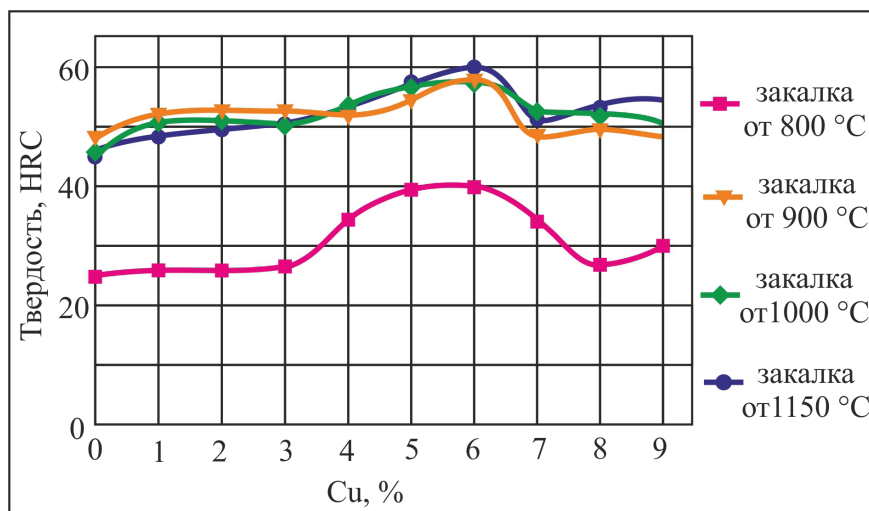


Рис. 9. Зависимость твердости литых и закаленных сталей от содержания меди

Fig. 9. Dependence of hardness of cast and quenched steels on copper content

более высоким уровнем износостойкости обладают образцы, подвергнутые закалке от 900 °C. Такое поведение сталей обусловлено формированием мелкокристаллической мартенситной структуры. Анализ представленных на рис. 11 результатов свидетельствует о том, что превы-

шение содержания меди свыше 6 % не рационально, поскольку интенсивность изнашивания легированных таким образом сталей возрастает. Основная причина такого изменения триботехнических свойств обусловлена, вероятно, выделением крупных включений медистой фазы, а

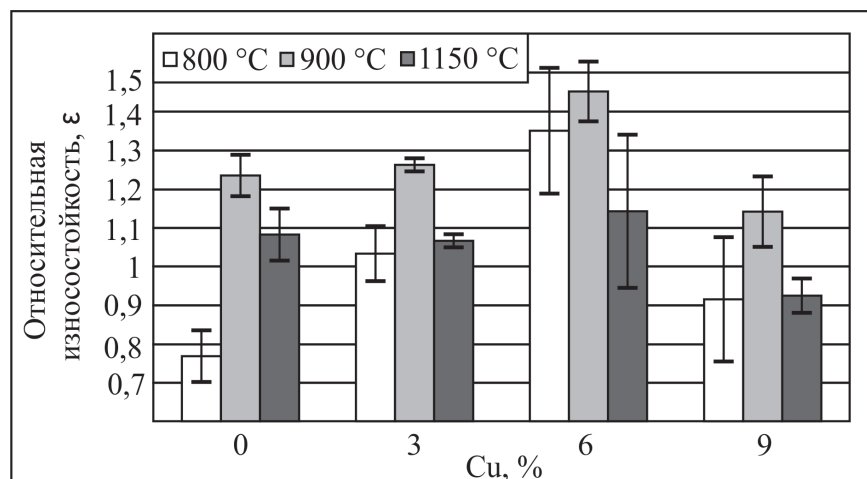


Рис. 10. Влияние меди и температуры закалки на относительную износостойкость сталей при трении о закрепленные частицы абразива

Fig. 10. Effect of copper and quenching temperature on the relative wear resistance of steels during friction on fixed particles of abrasive

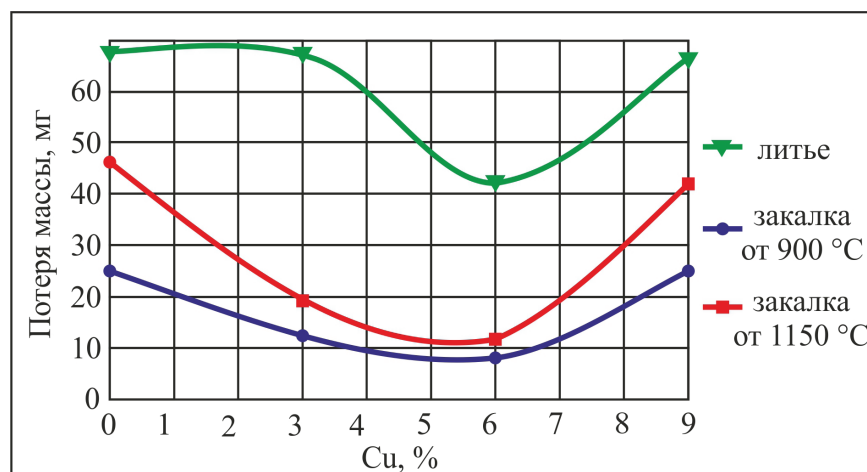


Рис. 11. Влияние содержания меди на стойкость закаленных и низкоотпущенных сталей при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы

Fig. 11. Influence of the copper content on the resistance of quenched and low-tempered steels during friction on non-rigidly fixed abrasive particles

также образованием пленочных выделений ϵ -Cu по границам бывших аустенитных зерен. Повышение температуры закалки легированных медью сталей до 1150 °C является фактором, негативно отражающимся на стойкости материалов в условиях воздействия как закрепленных, так и нежестко закрепленных частиц абразива.

Выводы

Основным механизмом упрочнения феррита в стальных термически не обработанных отлив-

ках, легированных медью, является образование наноразмерных равномерно распределенных по объему частиц ϵ -Cu. Нагрев отливок под закалку до аустенитного состояния сопровождается растворением меди в γ -фазе. На этапе ускоренного охлаждения медь переходит в твердый раствор на основе α -фазы и упрочняет его.

Наиболее высокими показателями твердости и износостойкости в условиях воздействия закрепленных и нежестко закрепленных абразивных частиц обладают легированные медью сплавы, закаленные от 900 °C, что обусловлено

формированием мелкодисперсной мартенситной структуры. Закалка от более высоких температур сопровождается огрублением структуры и соответствующим снижением твердости и износостойкости материалов.

Зависимость износостойкости легированных сталей от содержания меди носит экстремальный характер. Наиболее высоким комплексом триботехнических свойств в условиях абразивного изнашивания обладает сталь, содержащая 6 % меди.

Список литературы

1. *Silman G.I., Kamynin V.V., Goncharov V.V.* On the mechanisms of copper effect on structure in cast iron // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2007. – Vol. 49, iss. 7–8. – P. 387–393. – doi: 10.1007/s11041-007-0072-z.
2. Влияние меди на антифрикционные свойства серых чугунов / Н.В. Степанова, В. Кумар, В.А. Кузнецов, П.А. Попелюх, Е.Д. Головин // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2012. – № 1 (54). – С. 81–84.
3. Износостойкость заэвтектидной стали, легированной медью и алюминием / Н.В. Степанова, А.А. Батаев, А.А. Ситников, Т.Н. Осколкова // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2015. – № 4 (69). – С. 72–79. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-4-72-79.
4. *Sil'man G.I.* About retrograde solidus and stratification of melt in the Fe–Cu and Fe–Cu–C systems // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2009. – Vol. 51, iss. 1–2. – P. 19–24. – doi: 10.1007/s11041-009-9120-1.
5. Peculiarities of the precipitation of nanosized ϵ -phase copper particles in ferrite plates of lamellar pearlite / I.A. Bataev, N.V. Stepanova, A.A. Bataev, A.A. Nikulina, A.A. Razumakov // *Physics of Metals and Metallography*. – 2016. – Vol. 117, iss. 9. – P. 901–905. – doi: 10.1134/S0031918X16090015.
6. Composites of copper and cast iron fabricated via the liquid: In the vicinity of the limits of strength in a non-deformed condition / N.V. Stepanova, I.A. Bataev, Y.-B. Kang, D.V. Lazurenko, A.A. Bataev, A.A. Razumakov, A.M. Jorge Junior // *Materials Characterization*. – 2017. – Vol. 130. – P. 260–269. – doi: 10.1016/j.matchar.2017.06.025.
7. *Prasetyo Y., Lee S.K., Baek E.R.* Effect of copper addition on mechanical properties of nodular indefinite chilled iron (NICI) // *Key Engineering Materials*. – 2011. – Vol. 457. – P. 386–391. – doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.457.386.
8. Pearlite stabilization by copper on ductile cast iron / M. Tsujikawa, N. Matsumoto, K. Nakamoto, Y. Michiura // *Key Engineering Materials*. – 2011. – Vol. 457. – P. 151–156. – doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.457.151.
9. *Hsu C-H., Lin K-T.* A study on microstructure and toughness of copper alloyed and austempered ductile irons // *Materials Science and Engineering: A*. – 2011. – Vol. 528, iss. 18. – P. 5706–5712. – doi: 10.1016/j.msea.2011.04.035.
10. Microstructure and mechanical properties of as-cast ductile irons alloyed with manganese and copper / R.K. Dasgupta, D.K. Mondal, T.K. Chakrabarti, A.C. Ganguli // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2012. – Vol. 21 (8). – P. 1728–1736. – doi: 10.1007/s11665-011-0058-2.
11. Investigating the mechanical properties of 0.5 % copper and 0.5% nickel austempered ductile iron with different austempering parameters / B. Abdullah, S.K. Alias, A. Jaffar, F.A. Rahim, A. Ramli // *Advanced Materials Research*. – 2012. – Vol. 383–390. – P. 3313–3319. – doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.383-390.3313.
12. The effect of Cu on the microstructure and the elevated temperature properties of ferritic heat resistant cast iron / K. Choe, S. Lee, M. Kim, K. Lee // *Materials Science Forum*. – 2010. – Vol. 654–656. – P. 1448–1451. – doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.1448.
13. *Горкунов Д.Н.* Триботехника (износ и безыносность): учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: МСХА, 2000. – 616 с. – ISBN 5-94327-004-3.
14. *Ильин А.П., Назаренко О.Б., Рухерт С.В.* Влияние суспензии «моторное масло + смесь нанопорошков меди и никеля» на трибологические свойства пары трения «углеродистая сталь – низколегированная сталь» // *Известия Томского политехнического университета*. – 2004. – Т. 307, № 3. – С. 77–79.
15. *Сильман Г.И., Камынин В.В., Гончаров В.В.* Влияние меди на структуру и свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // *Заготовительные производства в машиностроении*. – 2010. – № 6. – С. 43–48.
16. *Sil'man G.I., Kamynin V.V., Tarasov A.A.* Effect of copper on structure formation in cast iron // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2003. – Vol. 45, iss. 7–8. – P. 254–258. – doi: 10.1023/A:1027320116132.
17. *Kamynin V.V.* Effect of structure on the tribotechnical properties of cast iron // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2007. – Vol. 49, N 7–8. – P. 398–400. – doi: 10.1007/s11041-007-0074-x.
18. *Stepanova N.V., Razumakov A.A.* The effect of doping with copper and aluminium on structure, mechanical and friction properties of steel // *The 8 International Forum on Strategic Technologies (IFOST 2013): proceedings, Mongolia, Ulaanbaatar*,

28 June – 1 July 2013. – Ulaanbaatar, 2013. – Vol. 1. – P. 240–242. – doi: 10.1109/IFOST.2013.6616977.

19. Яковлев А.Ю., Волчок И.П. Влияние меди на структуру и свойства графитизированной стали // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – № 1. – С. 44–46.

20. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 416 с. – ISBN 978-5-458-36211-5.

21. Особенности упрочнения феррита и перлита в сталях и чугунах, легированных медью / И.А. Батаев, Н.В. Степанова, А.А. Батаев, А.А. Разумаков //

Известия высших учебных заведений. Физика. – 2017. – № 6. – С. 86–90.

22. Особенности выделения наноразмерных частиц ϵ -фазы меди в ферритных промежутках пластинчатого перлита / И.А. Батаев, Н.В. Степанова, А.А. Батаев, А.А. Никулина, А.А. Разумаков // Физика металлов и металловедение. – 2016. – Т. 117, № 9. – С. 932–937. – doi: 10.7868/S0015323016090011.

23. Медь в черных металлах / пер. с англ. И.Д. Марчуковой и А.Н. Штейнберга; под ред. О.А. Баннных; под ред. И. Ле Мэя и Л.М.Д. Шетки. – М.: Металлургия, 1988. – 312 с. – ISBN 5-229-00073-2.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2018 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Structure and Properties of Heat-treated Medium-carbon Steels Alloyed with Copper

Tatyana Ogneva^{1, a, *}, Nikita Martyshev^{2, b}, Iris Altpeter^{3, c}, Mikhail Surkov^{2, d}, Alexandr Tokarev^{4, e},
Tatyana Krutskaya^{5, f}

¹ Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

³ Fraunhofer Institute for Non-Destructive Testing IZFP, Campus E3 1, Saarbrücken, 66123, Germany

⁴ Siberian State University of Water Transport, 33 Schetinkina st., Novosibirsk, 630099, Russian Federation

⁵ Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, 113 Leningradskaya st., Novosibirsk, 630008, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0002-0081-283X>,  ogneva@corp.nstu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0620-9561>,  martyshev@tpu.ru,

^c  <https://orcid.org/0000-0002-3006-625X>,  irisaltpeter@mail.ru, ^d  <https://orcid.org/0000-0002-3654-8401>,  masur@tpu.ru,

^e  <https://orcid.org/0000-0002-2841-3689>,  aot51@ngs.ru, ^f  <https://orcid.org/0000-0001-8003-4523>,  j_krutskii@rambler.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 March 2018

Revised: 02 April 2018

Accepted: 30 April 2018

Available online: 15 June 2018

Keywords:

Steel
Alloying with copper
Quenching
Structure
Wear resistance
ε-Cu nanoparticles

Funding:

This work is supported by the Russian Science Foundation under grant No. 15-19-00230.

ABSTRACT

Introduction. Copper alloyed steel is considered to be a possible alternative to expensive bronze in the manufacture of large-sized parts of heavy-duty sliding friction units. The operating conditions of these units assume the presence of large specific loads. Thus, the materials for its production should have a high complex of strength and tribological properties. Quenched iron-carbon steels have the greatest strength, however, nowadays, the issue of the effect of copper on the structure and properties of medium-carbon steels after quenching remains open. **The purpose of the work:** to study the structure, strength and tribotechnical properties of cast medium-carbon steel, alloyed with copper (0... 9 wt. %), after quenching from 800, 900, 1000 and 1150 °C and low tempering at 200 °C. **The methods of investigation.** Structural studies were performed using optical metallography, scanning electron microscopy and X-ray phase analysis. The mechanical properties of alloys after casting and quenching with low tempering were studied, the hardness of the Rockwell materials was evaluated, and the wear resistance test was carried out on fixed and non-rigidly fixed abrasive particles. **Results and discussion.** With the increase of copper content in the steel the size of the ferritic grains decreases and the dispersion of perlite increases. The nanosized inclusions of the copper ε-phase formed in the ferrite matrix were studied by transmission electron microscopy. Heating up to 800 °C doesn't provide an opportunity for complete quenching of steels alloyed with copper. In addition to martensite, the microvolumes of ferrite and perlite are present in the structure of alloys. Quenching from 900 °C leads to the formation of a completely martensitic structure. A further increase in the quenching temperature doesn't lead to a qualitative change in the structural composition. Inclusions of the copper phase predominantly have a shape close to spherical. However, after quenching from 1150 °C in an alloy with 9% copper, the ε-Cu inclusions precipitates as a thin films along the former boundaries of austenitic grains. The TEM investigations showed that heating for quenching leads to dissolution of copper nanosized inclusions. At the fast cooling stage, copper in the form of inclusions is not released. Alloying with copper up to 6 wt. % provides the growth of tribotechnical characteristics of medium-carbon steels. It was found that samples quenched from 900 °C have the highest complex of mechanical properties.

For citation: Ogneva T.S., Martyshev N.V., Altpeter I., Surkov M.A., Tokarev A.O., Krutskaya T.M. Structure and properties of heat-treated medium-carbon steels alloyed with copper. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 130–143. doi: 10.17212/1994-6309-2018-20.2-130-143. (In Russian).

References

1. Silman G.I., Kamynin V.V., Goncharov V.V. On the mechanisms of copper effect on structure in cast iron. *Metal Science and Heat Treatment*, 2007, vol. 49, iss. 7–8, pp. 387–393. doi: 10.1007/s11041-007-0072-z.

* Corresponding author

Ogneva Tatyana S., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Novosibirsk State Technical University,
 20 Prospekt K. Marksa,
 630073, Novosibirsk, Russian Federation
Tel.: 8 (383) 315-29-01, **e-mail:** ogneva@corp.nstu.ru

2. Stepanova N.V., Kumar V., Kuznetsov V.A., Popelukh P.A., Golovin E.D. Vliyanie medi na antifriktsionnyye svoystva serykh chugunov [Effect of copper addition on friction properties of gray cast iron]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2012, no. 1 (54), pp. 81–84.
3. Stepanova N.V., Bataev A.A., Sitnikov A.A., Oskolkova T.N. Iznosostoikost' zaevtektoidnoi stali, legirovannoi med'yu i alyuminiem [Wear resistance of hypereutectoid steel, alloy with copper and aluminum]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2015, no. 4 (69), pp. 72–79. doi: 10.17212/1994-6309-2015-4-72-79.
4. Sil'man G.I. About retrograde solidus and stratification of melt in the Fe–Cu and Fe–Cu–C systems. *Metal Science and Heat Treatment*, 2009, vol. 51, iss. 1–2, pp. 19–24. doi: 10.1007/s11041-009-9120-1.
5. Bataev I.A., Stepanova N.V., Bataev A.A., Nikulina A.A., Razumakov A.A. Peculiarities of the precipitation of nanosized ϵ -phase copper particles in ferrite plates of lamellar pearlite. *Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, iss. 9, pp. 901–905. doi: 10.1134/S0031918X16090015.
6. Stepanova N.V., Bataev I.A., Kang Y.-B., Lazurenko D.V., Bataev A.A., Razumakov A.A., Jorge Junior A.M. Composites of copper and cast iron fabricated via the liquid: In the vicinity of the limits of strength in a non-deformed condition. *Materials Characterization*, 2017, vol. 130, pp. 260–269. doi: 10.1016/j.matchar.2017.06.025.
7. Prasetyo Y., Lee S.K., Baek E.R. Effect of copper addition on mechanical properties of nodular indefinite chilled iron (NICI). *Key Engineering Materials*, 2011, vol. 457, pp. 386–391. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.457.386.
8. Tsujikawa M., Matsumoto N., Nakamoto K., Michiura Y. Pearlite stabilization by copper on ductile cast iron. *Key Engineering Materials*, 2011, vol. 457, pp. 151–156. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.457.151.
9. Hsu C-H., Lin K-T. A study on microstructure and toughness of copper alloyed and austempered ductile irons. *Materials Science and Engineering: A*, 2011, vol. 528, iss. 18, pp. 5706–5712. doi: 10.1016/j.msea.2011.04.035.
10. Dasgupta R.K., Mondal D.K., Chakrabarti T.K., Ganguli A.C. Microstructure and mechanical properties of as-cast ductile irons alloyed with manganese and copper. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, vol. 21 (8), pp. 1728–1736. doi: 10.1007/s11665-011-0058-2.
11. Abdullah B., Alias S.K., Jaffar A., Rahim F.A., Ramli A. Investigating the mechanical properties of 0.5% copper and 0.5% nickel austempered ductile iron with different austempering parameters. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 383–390, pp. 3313–3319. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.383-390.3313.
12. Choe K., Lee S., Kim M., Lee K. The effect of Cu on the microstructure and the elevated temperature properties of ferritic heat resistant cast iron. *Materials Science Forum*, 2010, vol. 654–56, pp. 1448–1451. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.1448.
13. Gorkunov D.N. *Tribotekhnika (iznos i bezyznosnost')* [Tribotechnics (wear and wearlessness)]. 4th ed. Moscow, MSKha Publ., 2000. 616 c. ISBN 5-94327-004-3.
14. Il'in A.P., Nazarenko O.B., Rikhter S.V. Vliyanie suspenzii "motornoe maslo + smes' nanoporoshkov medi i nikelya" na tribologicheskie svoystva pary treniya "uglerodistaya stal' – nizkolegirovannaya stal'" [Influence of the suspension "engine oil + mixture of nanopowders of copper and nickel" on the tribological properties of the friction pair "carbon steel-low alloy steel"]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2004, vol. 307, no. 3, pp. 77–79.
15. Sil'man G.I., Kamynin V.V., Goncharov V.V. Vliyanie medi na strukturu i svoystva vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom [Influence of copper on structure and properties of high-strength spheroidal graphite cast iron]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Blanking Productions in Mechanical Engineering*, 2010, no. 6, pp. 43–48.
16. Sil'man G.I., Kamynin V.V., Tarasov A.A. Effect of copper on structure formation in cast iron. *Metal Science and Heat Treatment*, 2003, vol. 45, iss. 7–8, pp. 254–258. doi: 10.1023/A:1027320116132.
17. Kamynin V.V. Effect of structure on the tribotechnical properties of cast iron. *Metal Science and Heat Treatment*, 2007, vol. 49, iss. 7–8, pp. 398–400. doi: 10.1007/s11041-007-0074-x.
18. Stepanova, N.V. Razumakov A.A. The effect of doping with copper and aluminium on structure, mechanical and friction properties of steel. *The 8 International Forum on Strategic Technologies (IFOST 2013): proceedings*, Mongolia, Ulaanbaatar, 28 June – 1 July 2013, vol. 1, pp. 240–242. doi: 10.1109/IFOST.2013.6616977.
19. Yakovlev A.Yu. Volchok I.P. Vliyanie medi na strukturu i svoystva grafitizirovannoi stali [Effect of copper on the structure and properties of graphitized steel]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov = Metal Science and Heat Treatment*, 2008, no. 1, pp. 44–46. (In Russian).
20. Kutateladze S.S., Borishanskii V.M. *Spravochnik po teploperedache* [Handbook of heat transfer]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1958. 416 p. ISBN 978-5-458-36211-5.

21. Bataev I.A., Stepanova N.V., Bataev A.A., Razumakov A.A. Osobennosti uprochneniya ferrita i perlita v stalyakh i chugunakh, legirovannykh med'yu [Features of hardening of ferrite and perlite in steels and cast iron alloyed with copper]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika = Russian Physics Journal*, 2017, no. 6, pp. 86–90.

22. Bataev I.A., Stepanova N.V., Bataev A.A., Nikulina A.A., Razumakov A.A. Osobennosti vydeleniya nano-razmernykh chastits ε -fazy medi v ferritnykh promezhutkakh plastinchatogo perlita [Peculiarities of the separation of nanoscale particles of the copper ε -phase in the ferrite gaps of the plate perlite]. *Fizika metallov i metallovedenie = The Physics of Metals and Metallography*, 2016, vol. 117, no. 9, pp. 932–937. doi: 10.7868/S0015323016090011. (In Russian).

23. May I.L., Schetky L.M., eds. *Copper in iron and steel*. New York, Wiley, 1982. 423 p. (Russ. ed.: *Med' v chernykh metallakh*. Ed. by O.A. Bannykh. Moscow, Metallurgiya Publ., 1988. 312 p.).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2018 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).