



УДК 621.78:669.018.24

*Куницкая И.Н.<sup>1</sup>, Спектор Я.И.<sup>1</sup>, Климов А.В.<sup>2</sup>, Ткач Д.В.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт специальных сталей, сплавов и ферросплавов». Украина, г. Киев

<sup>2</sup> Запорожский национальный технический университет. Украина, г. Запорожье

#### ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛИ ШХ15 МЕТОДАМИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

*В работе, для повышения качества подшипников из стали марки ШХ15, предложено использовать эффект динамической рекристаллизации. Это позволяет равномерно распределить примеси в объеме проката и снизить карбидную неоднородность. Разработанная энергосберегающая технология совмещенной деформационно-термической обработки подшипниковых сталей, которая позволяет получить конкурентоспособный прокат с улучшенными физико-механическими свойствами, в том числе, для подшипников перспективных авиадвигателей повышенного ресурса. При этом длительность сфероидизирующего отжига за счет использования тепла прокатного нагрева сокращается на 30 %.*

Ключевые слова: подшипниковая сталь; прокатка; динамическая рекристаллизация; карбиды; аустенитное зерно; энергосбережение; отжиг; гомогенизация

В современном авиадвигателестроении, в условиях необходимости повышения ресурса двигателей, значительно возросли требования к качеству сталей и сплавов, в том числе подшипниковых. Перспективным направлением в производстве высокоуглеродистых (в т.ч. теплостойких) подшипниковых сталей является развитие сквозных технологий совмещенной деформационно-термической обработки. Это позволяет сократить длительность сфероидизирующего отжига в термических цехах и участках и повысить энергосбережение за счет использования тепла прокатного нагрева [1, 2]. Совмещенная деформационно-термическая обработка позволяет получить микроструктуру, часто недостижимую при обычной технологии термической обработки проката с отдельного нагрева.

Наибольшие структурные эффекты достигаются при так называемой регулируемой (по температуре, степени и скорости) горячей деформации, а также регулируемом ускоренном или замедленном охлаждении после деформации в сочетании с оптимальными режимами последующего сфероидизирующего отжига. Это происходит вследствие формирования особого состояния горячедеформированного аустенита (размер зерна, дислокационная структура, распределение карбидной фазы) и его дальнейшего влияния на кинетику фазовых и структурных превращений при последующем охлаждении [3]. В процессе такой деформации уменьшается размер зерна; карбидная сетка и фрагменты пластинчатого перлита снижаются на 1-2 балла; средний размер карбидов уменьшается с 0,8 до 0,45 мкм. В результате последеформационного отжига повышается однородность и дисперсность зернистого перлита. Исследования особенностей образования карбидной сетки показали замедление ее выделения в деформированном аустените, а также ее утонение и прерывистое распределение по границам аустенитного зерна, измельченного в процессе рекристаллизации. На-

пример, при количественных исследованиях толщины и протяженности сетки в горячедеформированном аустените на разных стадиях упрочнения и рекристаллизации показано уменьшение этих параметров в 1,5-3 раза [3].

Следовательно, актуальным является исследование начальных стадий образования избыточных карбидов по границам аустенитного зерна для уточнения влияния рекристаллизации при горячей деформации на состояние границ зерен и разработка оптимальных режимов термомеханической обработки для получения наиболее оптимальной структуры стали и экономии энергоресурсов.

Объектом исследования являлись образцы стали марки ШХ15СГ, полученные при горячем кручении с различной степенью деформации при 850 °С (исходный нагрев 1100 °С) на торсионном пластомере «Ирсид». Состояние границ зерен изучалось методом электронной ОЖЕ-спектроскопии на спектрометре LAZ-2000.

Для выбора оптимальных режимов термомеханической обработки выполняли лабораторную прокатку на стане ДУО-250 «УкрНИИспецсталь», моделирующем условия станов «550» и «325». Предварительно полученные образцы прокатывались на толщину 7-13 мм за 3 прохода по 20 % каждый. Для наибольшего измельчения зерна и получения развитой субструктуры использована низкотемпературная прокатка при 900 °С. При этом длительность пауз между проходами составляла 1-3 с. Ускорение сфероидизации перлита предполагалось достичь подавлением выделения карбидной сетки в динамически рекристаллизованном аустените и формированием зародышей сфероидизированного перлита в процессе последеформационного охлаждения.

Исследование состояния границ зерен позволило установить обогащение углеродом и хромом (до начала выделения избыточных карбидов), как границ исходных зерен, так и границ динамически рекристаллизованных зерен (рис. 1).



Рис. 1. Зависимость отношений интенсивностей пиков линий оже-электронов фосфора (а), углерода (б) и хрома (в) к пиков железа на поверхности изломов стали ШХ15 в зависимости от степени горячей деформации при 850 °С

Установлено, что наибольшее обогащение границ углеродом и хромом характерно для исходных и деформированных нерекристаллизованных зерен. Анализ отношений интенсивностей  $(J_C/J_{Fe}) \times 100$  и  $(J_{Cr}/J_{Fe}) \times 100\%$  (рис. 1, б, в) показал, что с увеличением степени деформации, когда получает развитие динамическая рекристаллизация, содержание атомов углерода и хрома на границах исходных нерекристаллизованных зерен уменьшается. Наряду с этим происходит обогащение углеродом и хромом внутренних объемов зерна и границ динамически рекристаллизованных зерен, что свидетельствует о повышении однородности распределения этих элементов между внутренним объемом и границами при определенной сегрегации углерода на дислокациях и замедлением его выделения из твердого раствора. В процессе дальнейшего последеформационного охлаждения увеличение площади межзеренной поверхности в процессе динамической рекристаллизации будет способствовать уменьшению толщины и протяженности карбидной сетки.

Также установлено, что наибольшее обогащение границ фосфором характерно для исходных недеформированных зерен аустенита (рис. 1, а). С увеличением степени горячей деформации средний уровень сегрегации фосфора на границах деформированных зерен приближается к содержанию фосфора в теле зерна. Вероятно, это связано с «отрывом» (путем миграции) границы зерна при деформации от атомов фосфора. Фактором, который обеспечивает «закрепление» атомов фосфора в объеме зерна, по-видимому, выступает повышение плотности дислокаций и образование субзерен на стадии динамического возврата. Следовательно, горячая деформация способствует благоприятному перераспределению фосфора между приграничными областями и телом зерна, что должно снижать склонность к зернограничному разрушению высокопрочной мартенситной матрицы.

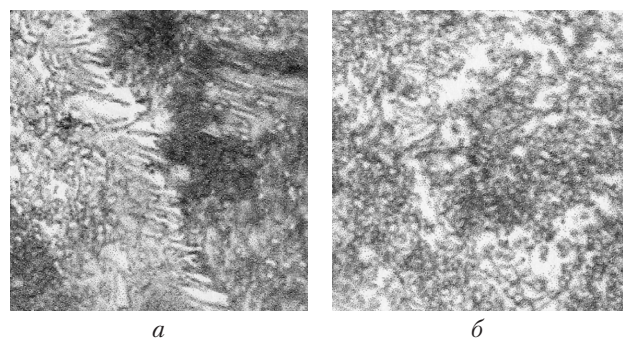
Таким образом, в очаге горячей пластической деформации начинаются структурные изменения, которые определяют качество готового отожженно-го проката по размеру зерна, карбидной сетке, степени сфероидизации карбидов, однородности зернистого перлита. В горячедеформированном при 850 °С аустенитном зерне стали ШХ15СГ происходит обогащение углеродом и хромом (до начала выделения избыточных карбидов), как на границах исходных зерен, так и динамически рекристаллизованных. Такое перераспределение элементов способствует уменьшению протяженности и толщины карбидной сетки.

Известно, что эффект влияния состояния аустенита на ускорение перлитного превращения в подшипниковых сталях связан как с сохранением остаточного наклепа аустенита и формированием при

охлаждении после горячей прокатки оптимальной структуры продуктов распада аустенита, так и с формированием структуры зернистого перлита в процессе сфероидизирующего отжига [4]. Такой перлит обеспечивает повышение технологичности при холодной обработке (высадке, обработке резанием, шлифовке, полировке тел качения подшипников), а также получение оптимальной структуры после окончательной термообработки деталей подшипников (заковки и низкого отпуска) – мартенсита с равномерно распределенными глобулярными карбидами размером до 1 мкм.

Традиционная технология сфероидизирующего отжига достаточно продолжительный и энергоемкий процесс, поэтому, для сокращения длительности отжига проката подшипниковых сталей, целесообразно использовать эффект динамической рекристаллизации аустенита, позволяющем снизить интенсивность выделения карбидов в виде сплошной сетки. Данный эффект был использован при разработке и опробовании технологии высокопроизводительного сфероидизирующего отжига проката подшипниковой стали ШХ15СГ.

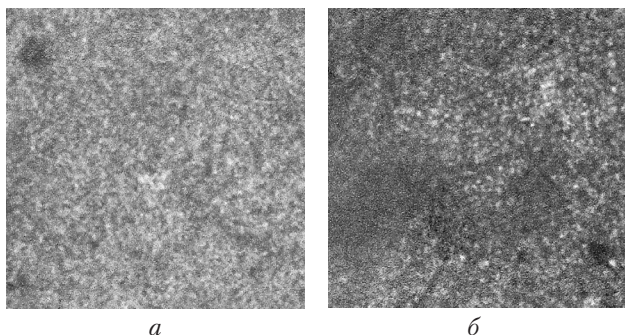
Исследованием исходных образцов, полученных деформацией на прокатном стане, установлены предельные и сверхнормативные баллы по карбидной сетке (5.3-5.5) и карбидной полосчатости (7.3-7.8), что свидетельствует о высокой ликвации хрома и углерода приводящей к формированию крупных карбидов в отожженном прокате прутка диаметром 105 мм (рис. 2).



а – исходное состояние (горячая прокатка); б – после прокатки со смягчающим отжигом.

Рис. 2. Микроструктура подшипниковой стали ШХ15СГ ( $\times 100$ )

Для уменьшения размера ликвационных явлений, связанных с образованием карбидной сетки выполнена гомогенизирующая термическая обработка по режиму с минимальной температурой и длительностью нагрева: при 1000 °С в течение 10 час. и в течение 5 час. при 1100 °С (рис. 3). Гомогенизация способствовала снижению величины карбидов на один балл, в сравнении с негомогенизированным металлом (балл 2.3 в сравнении с 2.4).



*a* – 1100 °С, 10 ч; *б* – 1100 °С, 5 ч.

**Рис. 3.** Микроструктура подшипниковой стали ШХ15СГ после гомогенизации (×100)

Для выбора наиболее оптимального режима ТО исследовали влияние различных режимов деформационно-термической обработки на структуру стали (табл. 1). Процессы последеформационного охлаждения заготовки, моделировали ускоренное (на воздухе) охлаждение в интервале выделения карбидной сетки (режимы №№ 1, 3, 5 – 9 табл. 1). Для сравнения также исследовано прерванное ускоренное охлаждение, которое достигалось за счет переноса образцов в нагретую и отключенную при 600 °С печь (режимы № 2 и № 4).

Прерванное охлаждение использовано для выравнивания температуры, ускорения образования зародышей зернистого перлита и повышения одно-

Таблица 1

### Режимы деформационно-термической обработки стали ШХ15СГ

№	Температура нагрева, °С / выдержка, мин	Режим прокатки		Структура после прокатки	Твердость по Роквеллу	Сфероидизирующий отжиг	Микроструктура (балл) по SEP1520		
		Охлаждение	Термообработка перед прокаткой				CG величина карбидов	РА доля пластинчатого перлита	CN карбидная сетка в отожженном состоянии
1	1100/20	На воздухе	Гомогенизация	Сорбит + троостит + перлит	39	Длительный, 61 час	2.3 (0,3-0,5 мкм)	3.1	4.1 (разорванная)
2	1100/20	В выключенной печи. Температура посадки 600 °С	Гомогенизация		35				2.3
3	1100/20	На воздухе	–		38		2.4 (0,7-0,8 мкм)	3.0 (отсутствует)	4.1
4	1100/20	В выключенной печи. Температура посадки 600 °С	–		34		2.4	3.2	4.1
5	1100/20	На воздухе	Гомогенизация		37		2.4	3.0	4.0
6	1100/20	На воздухе	–		37		2.4	3.0	4.0
7	1100/20	На воздухе	Гомогенизация		38		2.4	3.0	4.1
8	900/20	На воздухе	Гомогенизация	Зернистый перлит	26	Энергосберегающий, 44 часа	2.3	3.0	4.0
9	900/20	На воздухе	–		29				2.4

родности структуры после отжига по сечению деформированных заготовок.

Наилучшие результаты получены в процессе прокатки при 900 °С (режим № 8). Прокатка при этой температуре обеспечивала прохождение процесса динамической рекристаллизации (в соответствии с используемой для этого диаграммой рекристаллизации стали ШХ15). Охлаждение на воздухе имитировало процесс торможения выделения карбидов по границам зерен. Часть микроструктуры металла после деформации является уже частично сфероидизированной, а выделения карбидов по границам аустенитных зерен отсутствуют. Отжиг исследуемой стали выполнялся по двум режимам различной длительности (рис. 4).

При выборе режима сфероидизирующего отжига учитывались особенности микроструктуры, полученной после прокатки. Для заготовок стали ШХ15СГ с деформацией при 900 °С и наличием зародышей сфероидизированного перлита в микроструктуре выбран сфероидизирующий отжиг меньшей длительности.

Анализ влияния выбранных технологических параметров на микроструктуру горячекатаного металла и на структуру после отжига (зерно,

величина карбидов, формирование сфероидизированного перлита) показал, что наиболее эффективным является понижение температуры нагрева под прокатку с целью формирования динамически рекристаллизованного зерна (рис. 5). Промежуточное подстуживание металла без гомогенизации мало сказывается на температуре центральных зон, где особо развита ликвация и требуется подавление выделения карбидной сетки. Наибольший эффект установлен при сочетании гомогенизирующей термообработки заготовки и прокатки с температуры 900 °С (рис. 5, б, з). Размер карбидов в сфероидизированном перлите составляет 0,3-0,5 мкм в сравнении с более крупными (0,6-0,8 мкм) для металла прокатаного по другим режимам.

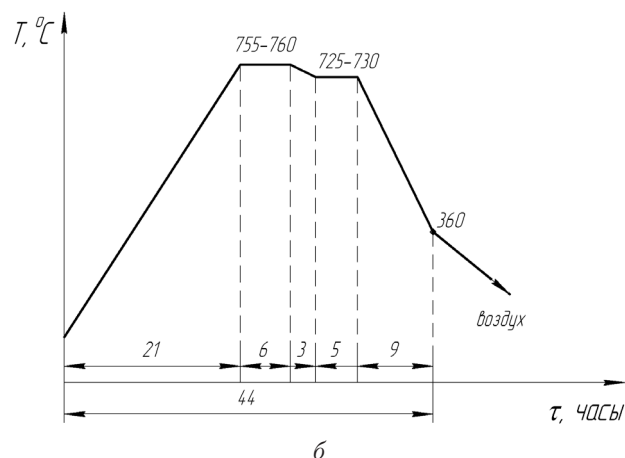
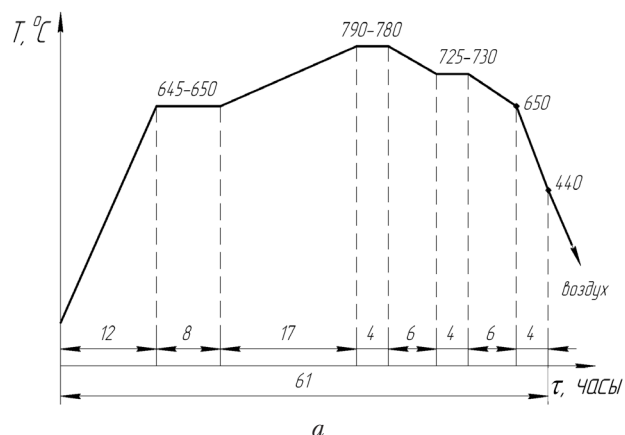
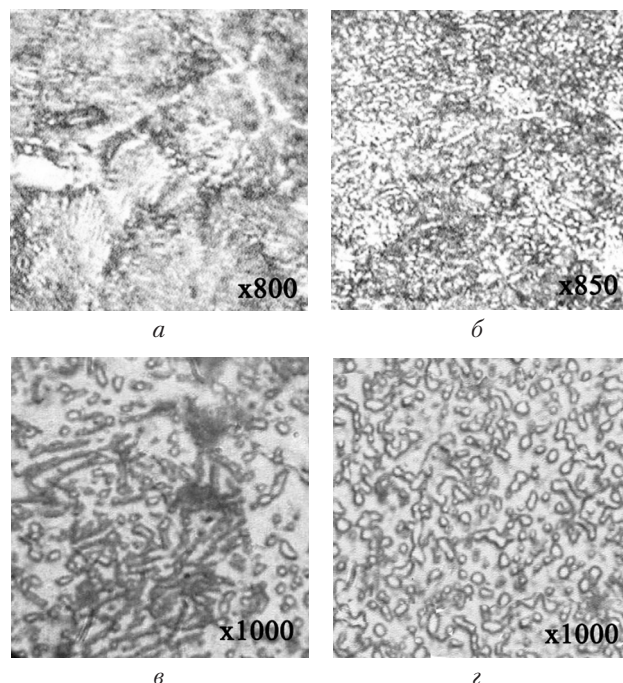


Рис. 4. Режимы сфероидизирующего отжига опытных образцов после прокатки по режимам №№ 1-7 – схема I (а); №№ 8, 9 – схема II (б)

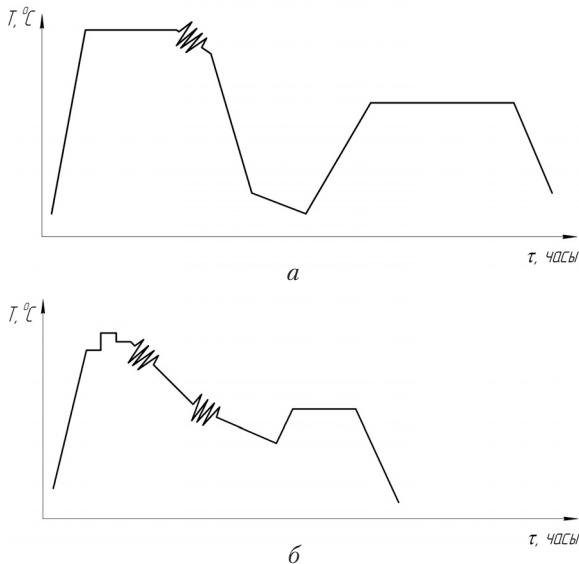


а, в – прокатка с 1100 °С (режим № 4 табл. 5.1); б, з – 900 °С (режим № 8 табл. 5.1).

Рис. 5. Наличие (а) и отсутствие (б) карбидной сетки, микроструктура сфероидизированного перлита (в, з) в стали ШХ15СГ

В стали без предварительной гомогенизации при повышенных температурах конца прокатки (1000-1100 °С) эффект влияния динамической рекристаллизации и регулируемого охлаждения на формирование структуры зернистого перлита не достигнут. Даже после отжига в микроструктуре присутствуют фрагменты и сплошные прослойки карбидов по границам крупных исходных аустенитных зерен (рис. 5, а, в).

Оптимизированная термомеханическая обработка позволяет получить структуру сфероидизированного перлита на один балл, а карбидная сетка на 2-3 балла ниже требований ГОСТ 801-78



**Рис. 6.** Термокинетические схемы горячей деформации сортового проката подшипниковых сталей по действующей технологии (а) и технологии совмещенной деформационно-термической обработки (б)

на подшипниковые стали. За счет образования зародышей сфероидизированных карбидов в рекристаллизованном при горячей деформации аустените длительность сфероидизирующего отжига сокращается на 27 % (44 часа вместо 61).

Таким образом, оптимальная технология совмещенной деформационно-термической обработки подшипниковых сталей со сфероидизирующим отжигом (рис. 6) для получения структуры сфероидизированного перлита включает – гомогенизирующий нагрев заготовки, регулируемую прокатку, промежуточное ускоренное охлаждение, низкотемпературную прокатку (в том числе с прерванным окончательным охлаждением) с дальнейшей порезкой на прутки и передачу на термообработку в печах на участке прокатного стана; сокращенный

сфероидизирующий отжиг проката или подката для калибровки. Качество полученного таким образом металла соответствует лучшим фотоэталонам шкал стандарта SEP 1520 на подшипниковые стали. Использование особенностей процессов структурообразования и рекристаллизации аустенита при многопроходной горячей деформации прокаткой подшипниковых сталей, позволили модернизировать технологию сфероидизирующего отжига в линиях прокатных станов для производства конкурентоспособного проката подшипниковых сталей с улучшенными физико-механическими свойствами, в том числе, для подшипников перспективных авиадвигателей повышенного ресурса (рис. 6). При этом длительность сфероидизирующего отжига за счет использования тепла прокатного нагрева сокращается на 30 %.

### Литература

- [1] Пути интенсификации технологии упрочнения проката / С.П. Еременко, М.Л. Бернштейн // Сталь. – 1986. – № 4. – С. 69 – 74.
- [2] Перспективные технологии совмещенной деформационно-термической обработки проката специальных сталей / Я.И. Спектор, А.В. Ноговицин, Ю.В. Артамонов [и др.] // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов конференции «Стародубовские чтения». – Вып. 45, ч. 4. – Дн-вск. ПГАСА. – 2008. – С. 18 – 31.
- [3] Влияние состояния аустенита на формирование карбидной сетки в высокоуглеродистых сталях / Ю.В. Яценко, Я. С. Спектор // Сталь – 1984. – № 10. – С. 75-76.
- [4] Ускорение отжига подшипниковой стали / М.И. Синельников, Е.А. Титаренко // Повышение качества и улучшение сортамента подшипниковых сталей в странах-членах СЭВ. – 1979. – Ч. II. – С. 48 – 52.

*Kunitskaya I.N.<sup>1</sup>, Spector Y.I.<sup>1</sup>, Klimov A.V.<sup>2</sup>, Tkach D.V.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Ukrainian State Research Institute of Special Steels, Alloys and Ferroalloys (USSI). Ukraine, Kiev

<sup>2</sup> Zaporizhzhya National Technical University. Ukraine, Zaporizhzhya

### OPTIMIZATION OF THE STRUCTURAL STATE OF STEEL SHKH15 BY THERMOMECHANICAL TREATMENT

*In work, to improve the quality of bearing steel ShKh15, proposed to use the effect of dynamic recrystallization. This allows to evenly distribute the impurities in the bulk and reduce carbide rolling irregularity. The developed energy-saving technology combined deformation and heat treatment of bearing steel, which provides a competitive rental with improved physical and mechanical properties, including, for bearings promising engines of increased resource. The duration of spheroidizing annealing by utilizing heat rolling heat is reduced by 30%.*

Keywords: bearing steel; rolling; dynamic recrystallization; carbides; austenite grain; energy conservation; annealing; homogenization

**References**

- [1] Puti intensivatsii tehnologii uprochneniya prokata / S.P. Eremenko, M.L. Bernshteyn // Stal. – 1986. – № 4. – S. 69 – 74.
- [2] Perspektivnyie tehnologii sovmeschennoy deformatsionno-termicheskoy obrabotki prokata spetsialnyih staley / Ya.I. Spektor, A.V. Nogovitsin, Yu.V. Artamonov [i dr.] // Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie: Sb. nauch. trudov konferentsii «Starodubovskie chteniya». – Vyip. 45, ch. 4. – Dn-vsk. PGASA. – 2008. – S. 18 – 31.
- [3] Vliyanie sostoyaniya austenita na formirovanie karbidnoy setki v vyisokouglerodistyih stalyah / Yu.V. Yatsenko, Ya. S. Spektor // Stal – 1984. – № 10. – S. 75-76.
- [4] Uskorenie otzhiga podshipnikovoy stali / M.I. Sinelnikov, E.A. Titarenko // Povyishenie kachestva i uluchshenie sortamenta podshipnikovyyih staley v stranah-chlenah SEV. – 1979. – Ch. II. – S. 48 – 52.