

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, СПОСОБСТВУЮЩИХ СНИЖЕНИЮ КАРБИДНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ В ПОДШИПНИКОВЫХ МАРКАХ СТАЛИ

И. А. ПАНКОВЕЦ¹, инженер-технолог 1-й категории технического управления прокатного отдела, ivanpankovec@gmail.com; С. А. САВЧЕНКО¹, инженер-технолог технического управления прокатного отдела; В. И. ВОЗНАЯ¹, ведущий инженер испытательной лаборатории ЦЗЛ; М. Н. ВЕРЕЩАГИН², д-р техн. наук, профессор кафедры “Металлургия и технологии обработки материалов”; И. В. АСТАПЕНКО², канд. с.-х. наук, доцент кафедры “Металлургия и технологии обработки материалов”, astapenko@tut.by
(¹ ОАО “БМЗ – управляющая компания холдинга “БМК”, Республика Беларусь, Гомельская обл., г. Жлобин;
² Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого, Республика Беларусь, г. Гомель)

Аннотация. В настоящее время для выполнения требований к качеству подшипниковых сталей необходимо провести оценку карбидной неоднородности по SEP 1520 и обеспечить уровень карбидной сетки, карбидной ликвации и полосчатости, не превышающий заданных пределов, установленных потребителем. Для оценки возможности снижения карбидной неоднородности (сегрегации) рассмотрены факторы, влияющие на ее величину в прокатном производстве. Приведено описание процесса производства сортового проката из подшипниковых сталей на прокатном стане 370/150 ОАО “БМЗ – управляющая компания холдинга “БМК”. Рассмотрены возможности действующего оборудования стана для выполнения технологических мероприятий, направленных на снижение карбидной неоднородности в готовом сорте. Исследованы факторы, способствующие снижению карбидной неоднородности в условиях стана 370/150. С целью определения влияния температурных режимов на величину карбидной неоднородности в подшипниковых сталях в процессе трех кампаний осуществлялось поэтапное снижение температуры конца прокатки. Представлены результаты анализа данных, полученных при производстве профилей сортового проката диам. 34–50 мм из подшипниковых сталей. Сформулированы выводы по производству проката из подшипниковых сталей с высокими требованиями к величине карбидной неоднородности. Показано, что для получения высококачественного сортового проката целесообразно производить нагрев в печи перед прокаткой не менее 600 мин при температуре в томильной зоне 1150–1220 °С с последующим применением технологии нормализующей прокатки и контролем температуры конца прокатки 750 °С. Для профилей с вытяжкой менее 25 % в последней клетке рекомендуется проводить дополнительную термическую обработку готового профиля — нормализацию. Длительный нагрев заготовок перед прокаткой при температуре 1150–1220 °С позволяет снизить карбидную неоднородность до приемлемого уровня (карбидная ликвация не более балла 3 и карбидная полосчатость не более балла 4). Величина карбидной сетки уменьшается при снижении температуры конца прокатки и увеличении величины деформации в последних клетях. Стабильный удовлетворительный результат (CN не более балла 5.4) достигнут при температуре конца прокатки 750 °С и вытяжке более 25 %. Установлено, что чем выше суммарная вытяжка, тем ниже балл карбидной сетки и ликвации на готовом профиле, что обусловлено дроблением нерастворившихся карбидов на отдельные фрагменты.

Ключевые слова: прокатный стан 370/150, качество проката из подшипниковых сталей, карбидная неоднородность, карбидная ликвация, карбидная полосчатость, карбидная сетка.

Ссылка для цитирования: Панковец И.А., Савченко С.А., Возная В.И., Верещагин М.Н., Астапенко И.В. Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых марках стали // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2021. Т. 77. № 7. С. 804-810.

Doi: 10.32339/0135-5910-2021-7-804-810

STUDY OF FACTORS CONTRIBUTING TO DECREASE OF CARBIDE HETEROGENEITY IN BEARING GRADES OF STEEL

I. A. PANKOVETS¹, engineer-technologist of 1st category, Technical dpt. of rolling shop, ivanpankovec@gmail.com; S. A. SAVCHENKO¹, engineer-technologist, Technical dpt. of rolling shop; V. I. VOZNAYA¹, leading engineer, Testing lab. of CZL; M. N. VERESHCHAGIN², HD (Tech.), Prof., Dpt. “Metallurgy and technologies of materials processing”; I. V. ASTAPENKO², PhD (Agriculture), Prof. Ass., Dpt. “Metallurgy and technologies of materials processing”, astapenko@tut.by
(¹ OJSC “BMZ – managing company of the holding “BMK”, Republic of Belarus’, Gomel’ rgn., Zhlobin;
² Gomel’ State Technical University after P.O. Sukhoy, Republic of Belarus’, Gomel’)

Abstract. At present to meet requirement to the quality of bearing steels it is necessary of accomplish estimation of carbide heterogeneity by SEP 1520 and provide the level of carbide network, carbide liquation and streaking, not exceeding adjusted limits, required by customer. To estimate possibility to decrease carbide heterogeneity (segregation), factors influencing its value in the rolling production considered. Description of the process of long products of bearing steels production at the rolling mill 370/150 of the OJSC “BMZ – managing company of the holding “BMK” presented. Possibilities of the existing mill equipment considered for

accomplishing of technological operations aimed at decrease of carbide heterogeneity in the finished product. The factors studied, contributing to decrease of carbide heterogeneity under conditions of mill 370/150 operation. To determine the temperature modes effect on the level of carbide heterogeneity in bearing steels, in the process of three campaigns phased decrease of the temperature of end of rolling was accomplished. Results of data analysis obtained at the production of long products profiles of 34-50 diameter of bearing steel grades presented. Conclusion on rolled stock production of bearing steel grades with high requirements to carbide heterogeneity value was formed. It was shown that to obtain high-quality long products it is appropriate to accomplish the heating in the furnace before the rolling no less than 600 min at the temperature in the soaking zone 1150–1220°C followed by application of technology of normalizing rolling and control of temperature of the end of rolling 750°C. For profiles with drawing less 25% it is recommended to accomplish additional heat treatment of the finished profile – normalization. Long time heating of workpieces before the rolling at the temperature 1150–1220°C enables to decrease the carbide heterogeneity down to acceptable level (carbide liquation no more than 3 points and carbide streaking no more than 4 points). The value of carbide network is decreasing at decreasing of temperature of the end of the rolling and increasing deformation value in the last stands. A stable satisfactory result (CN no more than 5.4) was reached at the temperature of the end of rolling 750°C and drawing more than 25%. It was established that the higher the total drawing, the lower the point of carbide network and liquation in the finished profile, which is caused by crushing of non-dissolved carbides to separate fragments.

Key words: rolling mill 370/150, quality of rolling products of bearing steels, carbide heterogeneity, carbide liquation, carbide streaking, carbide network.

For citation: Pankovets I.A., Savchenko S.A., Voznaya V.I., Vereshchagin M.N., Astapenko I.V. Study of factors contributing to decrease of carbide heterogeneity in bearing grades of steel. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2021, vol. 77, no. 7, pp. 804-810. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2021-7-804-810

Ведущие европейские производители подшипников, предъявляя требования к качеству подшипниковой стали, делают акцент на снижении карбидной неоднородности — карбидной ликвации в сомкнутой и раздробленной форме и карбидной сетки [1, 2]. Для выполнения самых жестких требований потребителей подшипниковых сталей необходимо обеспечить следующий уровень карбидной неоднородности с оценкой по SEP 1520 [3]:

- карбидная сетка CN5 — не более балла 5.4 (центр — 20 % диаметра) и не более балла 5.2 (наружная зона — 80 % диаметра);

- карбидная ликвация сомкнутая CZ6 — не более балла 6.3 (центр — 20 % диаметра) и не более балла 6.2 (наружная зона — 80 % диаметра);

- карбидная ликвация раздробленная (карбидная полосчатость) CZ7 — не более балла 7.4 (центр — 20 % диаметра) и не более балла 7.3 (наружная зона — 80 % диаметра).

Карбидная ликвация сомкнутая CZ6 и карбидная ликвация раздробленная CZ7 являются следствием прокатки заготовок с местным (осевым в случае непрерывной разливки) скоплением карбидов (рис. 1). Карбидная ликвация ухудшает износостойкость изделий из подшипниковой стали. Ввиду высокой твердости и хрупкости карбиды выкрашиваются при выходе на рабочую поверхность с образованием очагов разрушения.

Образование карбидной сетки происходит по границам аустенитного зерна при прокатке заэвтектоидных сталей при недостаточной скорости охлаждения (рис. 2). Наличие карбидной сетки в структуре материала вызывает ухудшение механической прочности подшипника, склонность изделия к трещинообразованию при закалке, снижение ударной вязкости и контактной выносливости.

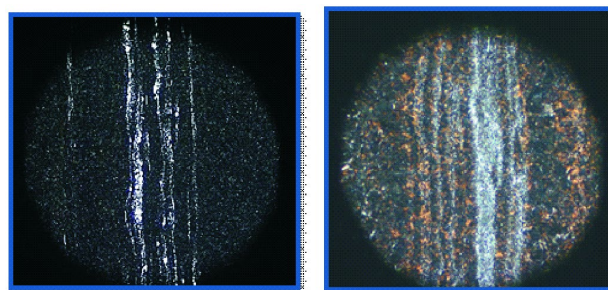


Рис. 1. Карбидная ликвация в продольном сечении прутка из стали 100Cr6 после травления в 10 %-ном растворе азотной кислоты в спирте, $\times 100$:
а — сомкнутая CZ6; б — раздробленная CZ7

Fig. 1. Carbide liquation in longitudinal section of steel 100Cr6 rod after etching in 10% solution of nitric acid in alcohol, $\times 100$:
a — closed CZ6; б — fragmented CZ7

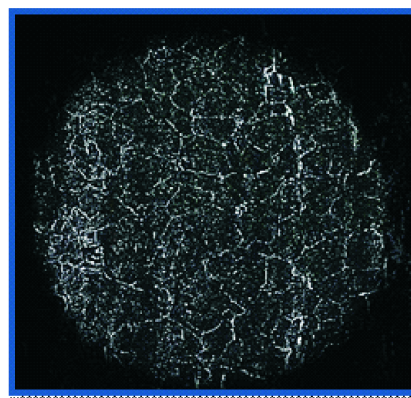


Рис. 2. Карбидная сетка в продольном сечении прутка из стали 100Cr6 после травления в 10 %-ном растворе азотной кислоты в спирте, $\times 200$

Fig. 2. Carbide network in the longitudinal section of steel 100Cr6 bar after etching in 10% solution of nitric acid in alcohol, $\times 200$

Факторы, влияющие на снижение карбидной неоднородности в прокатном производстве

С целью определения причин образования карбидной сетки и карбидной ликвации на сортовой стали подшипниковых марок, а также определения путей их устранения был произведен обзор технической литературы.

Для эффективного раздробления карбидной сетки непрерывнолитую заготовку (НЛЗ) прокатывают в области температур, при которых структура металла состоит из однородного аустенита. Выделение заэвтектоидных карбидов из аустенита начинается с температуры примерно 850 °С, а интенсивное образование карбидной сетки происходит в интервале температур 750–700 °С [4]. Кроме того, эффективное раздробление карбидной сетки в процессе прокатки достигается только при температуре металла 700–750 °С и обжатиях, превышающих 25 %. Теоретически рассчитанная температура начала распада аустенитного зерна для стали 100Cr6 составляет примерно 760 °С [5].

Методы устранения карбидной ликвации лежат в основе технологии выплавки и разлива, в прокатном же производстве и при термообработке возможна лишь минимизация негативных факторов, влияющих на потребительские свойства подшипников. Основным мероприятием в прокатном производстве, направленным на уменьшение карбидной ликвации CZ6 и CZ7, является создание условий для диффузии — равномерного распределения атомов карбида железа по всему объему заготовки [6]. Равномерное распределение атомов карбида железа достигается при гомогенизирующем (диффузионном) отжиге. Гомогенизирующий отжиг проводят на слитках и НЛЗ при высоких температурах (порядка 1100–1200 °С), так как в этом случае более полно протекают диффузионные процессы, обеспечивающие выравнивание химического состава по всему объему металла [7].

Оценка возможностей оборудования

На станах 370/150 и 850 нагрев заготовок производится в методической, комбинированной печи с шагающим подом, с верхним и нижним нагревом, боковой загрузкой и выдачей. Печь предназначена для нагрева заготовок до температуры прокатки с максимальной температурой в зоне томления 1260 °С, что дает возможность проведения гомогенизации. Далее нагретые заготовки прокатываются на стане 370/150 по двум различным технологиям (в зависимости от марки стали и назначения конечного продукта):

- горячая прокатка прутка диаметром от 20 до 80 мм;
- нормализующая прокатка прутка диаметром от 20 до 60 мм.

При производстве круглых заготовок из горячекатаных сталей 100Cr6, 100CrMnSi6, ШХ15, ШХ15СГ используются обе технологии прокатки.

Горячая прокатка является наиболее распространенной технологией, не требующей сложных технических решений. Но так как корректировка и контроль температуры раската в процессе прокатки не проводится, охлаждение происходит неконтролируемо.

Нормализующая прокатка осуществляется с помощью водоохлаждаемых секций, установленных в линии стана. Преимуществом данной технологии является возможность контроля температуры раската в процессе прокатки для обеспечения физико-механических свойств и структурных превращений, недостатком — низкая производительность и дополнительные энергозатраты.

Согласно техническим возможностям оборудования, минимальная возможная температура проката в редуционно-калибровочном блоке (РКБ) при технологии нормализующей прокатки составляет 750 °С, что полностью обеспечивает температуру начала распада аустенитного зерна при производстве прутка из подшипниковых сталей.

Исследование факторов, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых сталях

Для исследования влияния температурных режимов на величину карбидной неоднородности было проведено поэтапное снижение температуры конца прокатки на трех кампаниях (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ ПРОКАТКИ

TABLE 1. TEMPERATURE MODES OF ROLLING

Профиль, мм	Температура, °С			Карбидная сетка CN5	Карбидная ликвация	
	начало прокатки	РКБ	конец прокатки		смянутая CZ6	раздробленная CZ7
1-я кампания						
34	1120	965	865	5.6	6.2	7.4
36	1100	960	870	5.5	6.3	7.3
45	1115	940	855	5.4	6.3	7.4
50	1095	950	855	5.7	6.3	7.3

Профиль, мм	Температура, °С			Карбидная сетка CN5	Карбидная ликвация	
	начало прокатки	РКБ	конец прокатки		сомкнутая CZ6	раздробленная CZ7
2-я кампания						
34	1095	940	835	5.4	6.3	7.4
36	1090	940	835	5.3	6.3	7.4
45	1110	870	770	5.3	6.2	7.4
50	1110	865	770	5.5	6.3	7.3
3-я кампания						
34	1110	905	790	5.3	6.3	7.3
36	1095	910	795	5.1	6.3	7.4
45	1100	830	745	5.1	6.2	7.4
50	1090	835	755	5.4	6.3	7.3

Из данных табл. 1 видно, что при снижении температуры конца прокатки величина карбидной сетки уменьшается. На величину карбидной ликвации и карбидной полосчатости температура конца прокатки не повлияла. При анализе полученных результатов карбидной сетки в готовом сорте наилучший эффект достигнут при температурно-скоростном режиме 3-й кампании, наилучший результат получен на профилях 36 и 45 мм.

Система калибров в условиях стана 370/150 универсальна (суть универсальности заключается в прокатке нескольких типов профилей на прокатных клетях по типу калибровки овал–круг с

изменением только чистовых калибров). Наибольшая доля продукции из подшипниковых сталей приходится на круги диаметром от 34 до 50 мм из стали 100Сг6. Деформационные режимы в РКБ зависят от конечного диаметра. По имеющимся калибровкам обжатие в РКБ за один проход в зависимости от прокатываемого профиля достигает максимального значения 35 %, что также удовлетворяет условиям эффективного раздробления карбидной сетки. В качестве примера представлены единичные вытяжки для смежных профилей исследуемого диапазона (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ ПРОКАТКИ В ЧИСТОВЫХ КЛЕТЯХ

TABLE 2. DEFORMATION MODES OF ROLLING IN FINISHING STANDS

Профиль	Вытяжка		Профиль	Вытяжка	
	РКБ (22, 23, 24)	суммарная		РКБ (22, 23, 24)	суммарная
34	1.102	1.351	45	1.316	1.719
	1.184			1.281	
	1.077			1.051	
35	1.130	1.303	48	1.218	1.512
	1.137			1.214	
	1.056			1.054	
36	1.317	1.774	50	1.139	1.395
	1.294			1.199	
	1.067			1.052	

Из данных табл. 2 видно, что при производстве кругов диаметром от 34 до 50 мм только для профилей 36 и 45 мм деформационные режимы в клети № 22 удовлетворяют условиям дробления карбидной сетки, вытяжка составляет 1.317 (32 %). Для остальных диаметров приведенного диапазона вытяжка находится в диапазоне от 1.10 до 1.14 (10–14 %), что не гарантирует получение структуры с низким баллом карбидной сетки (см. табл. 1).

Кроме того, на всех кампаниях прослеживается влияние на карбидную сетку величины обжатия в чистовых клетях. При равных температурах конца прокатки карбидная сетка на профилях 36

и 45 мм составила в среднем на два балла меньше по сравнению с карбидной сеткой, полученной на профилях 34 и 50 мм. Из всего вышесказанного закономерен вывод, что совместное воздействие двух факторов — вытяжки в последних клетях более 25 % и снижения температуры конца прокатки — позволяет гарантировать стабильно низкий уровень карбидной сетки.

Для профилей, не имеющих вытяжку 25 % в последней клети, в силу «универсальности» калибровки (изменение калибра одной клети повлечет за собой изменение калибровки всей группы клетей) изменение калибровки является нецелесообразным. В качестве корректирующего

мероприятия для получения карбидной сетки не более балла 5.4 на таких профилях допускается дополнительная термическая обработка готового круга — нормализация [8]. На примере плавки из стали 100CrMnSi6 диам. 50 мм, прокатанной по технологии нормализующей прокатки, была получена величина карбидной сетки CN балла 5.5. Дополнительная нормализация позволила снизить карбидную сетку CN до балла 5.3.

Для дальнейшего поиска путей, способствующих снижению карбидной неоднородности в подшипниковых сталях, рассмотрено влияние режимов нагрева НЛЗ перед прокаткой. В рамках исследования от опытной плавки и стали 100Cr6 были отобраны четыре пробы сечением 250×300 с каждого ручья машины непрерывного литья заготовок. От каждого бьюма был отобран один темплет поперечного сечения и вырезаны по три образца для исследования микроструктуры согласно схеме, представленной на рис. 3.

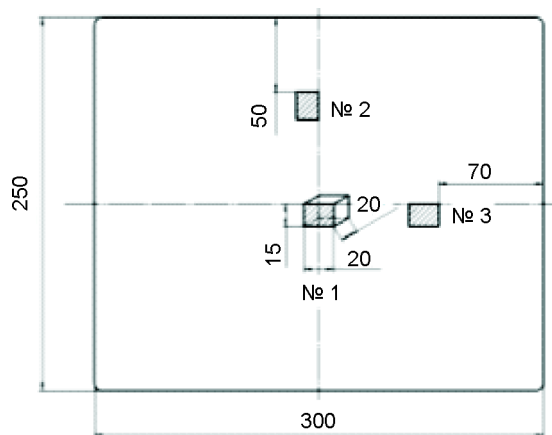


Рис. 3. Схема вырезки проб для исследования микроструктуры

Fig. 3. Diagram of samples cutting for microstructure study

Микроструктура образцов, вырезанных по схеме на рис. 3 из бьюмов А05, В05, С05 и D05, представляет собой крупнозернистую перлитную смесь с выделением цементита II и характерна для литого изделия из заэвтектоидных сталей с содержанием углерода порядка 1 %. После закалки микрошлифов избыточные карбиды четко выражены на фоне мартенситной матрицы. В разных зонах НЛЗ концентрация избыточных карбидов различна — максимальное количество карбидов сконцентрировано в осевой зоне заготовки в виде как отдельных глобулей, так и грубой сетки по границам зерна литой заготовки (рис. 4, а, б). В середине малого и большого радиусов имеет место выделение единичных частиц карбидов (см. рис. 4, в, г). Различия в мик-

роструктуре заготовки с разных ручьев выявлено не было.

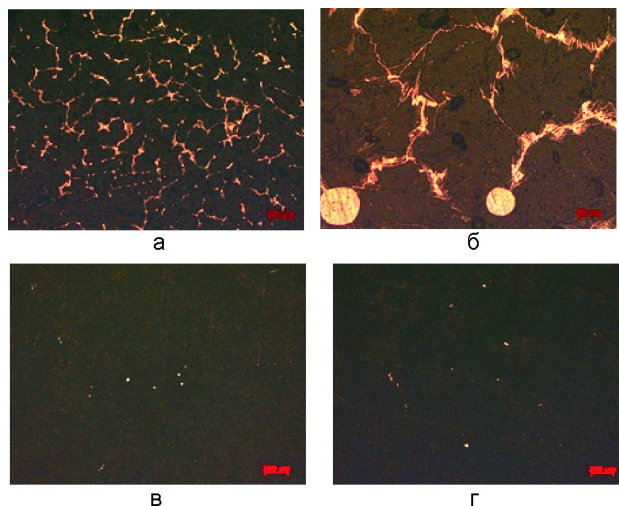


Рис. 4. Микроструктура образца А05:

а, б — избыточные карбиды в виде глобулей и грубой сетки по границам зерна в осевой зоне НЛЗ; в, г — единичные частицы карбидов в зоне середины малого и большого радиусов НЛЗ

Fig. 4. Microstructure of sample A05:

а, б — excessive carbides in the form of globules and coarse network at grain boundaries in the center zone of CC billet; в, г — isolated carbide particles in the zone of middle of small and large radii of CC billet

Блюмы А05, В05, С05 и D05 нагревали перед прокаткой по трем вариантам:

– А05 по режиму № 1 — нагрев в печи стана 370/150 в течение 360 мин по стандартной технологии (температура в томильной зоне 1120–1190 °С);

– С05 и В05 по режиму № 2 — нагрев в печи стана 370/150 в течение 600 мин по опытному режиму нагрева (температура в томильной зоне 1150–1220 °С);

– D05 по режиму № 3 — нагрев в печи стана 850 в течение 600 мин (температура в томильной зоне 1100–1190 °С) с последующей выдачей на аварийную решетку, замедленное охлаждение под термоколпаками до температуры окружающей среды (36 ч), нагрев в печи стана 370/150 по стандартной технологии для нагрева до температуры начала прокатки.

Прокатка осуществлялась в условиях стана 370/150 по действующей технологии на пруток диам. 45 мм. На готовом прутке оценивалась карбидная неоднородность на продольных шлифах всего поперечного сечения прутка (табл. 3, рис. 5).

ТАБЛИЦА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

TABLE 3. RESULTS OF METALLOGRAPHIC STUDIES

Образец, режим нагрева	Карбидная ликвация			
	в замкнутой форме CZ6		в раздробленной форме CZ7	
	поверхность	центр	поверхность	центр
A05, режим № 1	6.2	6.3	7.3	7.4
C05, режим № 2	6.0	6.1	7.1	7.2
B05, режим № 2	6.0	6.1	7.0	7.1
D05, режим № 3	6.0	6.0	7.0	7.0

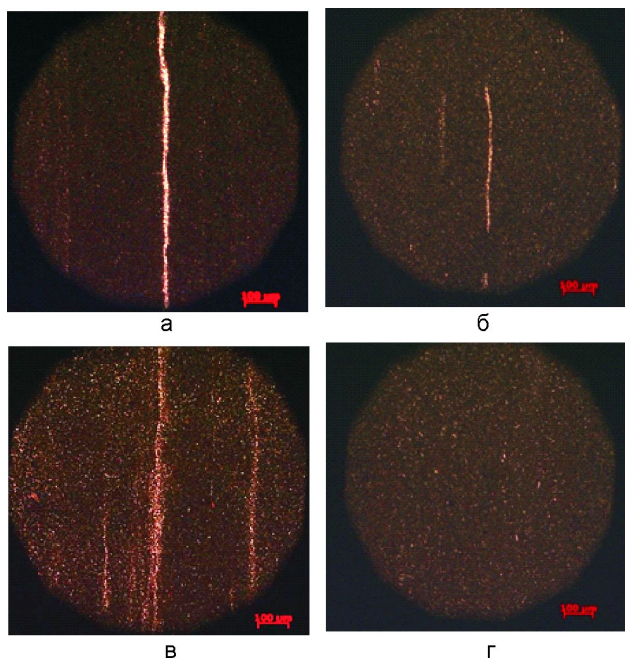


Рис. 5. Микроструктура горячекатаного прутка диам. 45 мм:

a — A05, режим № 1; б — C05, режим № 2;
в — B05, режим № 2; г — D05, режим № 3

Fig. 5. Microstructure of hot-rolled rod of 45 mm diameter:
a — A05, mode № 1; б — C05, mode № 2; в — B05,
mode № 2; г — D05, mode № 3

По результатам испытаний опытной плавки с разными режимами нагрева перед прокаткой видно, что при режиме нагрева № 1 (по стандартной технологии) получен уровень карбидной неоднородности 6.3/7.4. При режиме № 2 (нагрев по опытному режиму с выдержкой в печи 600 мин) — 6.1/7.2, при режиме № 3 (нагрев по опытному режиму на стане 850 с выдержкой в печи 600 мин и повторным нагревом на стане 370/150) — карбидная ликвация полностью устранена — 6.0/7.0.

Таким образом, гомогенизирующий отжиг с выдержкой в интервале температур 1150–1220 °С и последующим замедленным охлаждением под термоколпаками до температуры окружающей среды в течение 36 ч позволяет полностью

устранить карбидную неоднородность в НЛЗ еще перед прокаткой.

Эмпирическим путем выявлен еще один фактор, влияющий на снижение карбидной неоднородности, — суммарная вытяжка при прокатке. С уменьшением профиля (с увеличением суммарной вытяжки) наблюдается снижение балла карбидной сетки и ликвации. Данный факт объясняется дроблением аустенитного зерна с увеличением длины раската, утончением зоны ликвации в центре и дроблением ее на отдельные элементы. Данное наблюдение можно констатировать только как факт, ввиду того, что при использовании одного типоразмера исходной заготовки возможность управления суммарной деформацией отсутствует.

На рис. 6 представлена зависимость величины суммарной вытяжки от конечного профиля для действующих таблиц калибровок. Величина карбидной сегрегации на рис. 6 приведена в последовательности CN5/CZ6/CZ7.

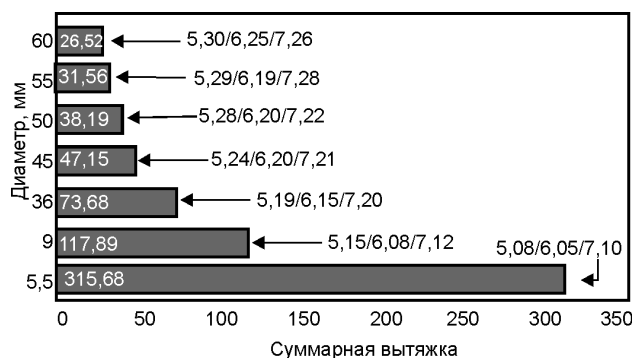


Рис. 6. Зависимость суммарной вытяжки от диаметра готового прутка и средняя величина карбидной сегрегации за 2017–2019 гг.

Fig. 6. Dependence of total drawing on the diameter of finished rod and average value of carbide segregation within 2017–2019

Практически замечено, что с увеличением суммарной вытяжки снижаются ликвационные проявления в стали — чем меньше профиль поперечного сечения, тем ниже карбидная сегрегация.

Выводы

1. Гомогенизирующий отжиг, а именно длительный нагрев заготовок (600 мин) перед прокатом, при температуре 1150–1220 °С позволяет снизить карбидную неоднородность до приемлемого уровня (карбидная ликвация не более балла 3 и карбидная полосчатость не более балла 4).

2. Величина карбидной сетки уменьшается при снижении температуры конца прокатки и увеличении величины деформации в последних клетях; стабильный удовлетворительный результат (CN не более 5.4) достигнут при температуре конца прокатки 750 °С и вытяжке более 25 %.

3. Чем выше суммарная вытяжка, тем ниже балл карбидной сетки и ликвации на готовом профиле, что обусловлено дроблением

нерастворившихся карбидов на отдельные фрагменты.

Обсуждение результатов

В условиях стана 370/150 в ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК» при производстве подшипниковых сталей в целях получения высококачественного сортового проката целесообразно производить нагрев в печи перед прокаткой не менее 600 мин при температуре в томильной зоне 1150–1220 °С с последующим применением технологии нормализующей прокатки и контролем температуры конца прокатки 750 °С. Для профилей с вытяжкой менее 25 % в последней клетке РКБ рекомендуется проводить дополнительную термическую обработку готового профиля — нормализацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Спектор А.Г., Зельберт Б.М., Киселева С.А. Структура и свойства подшипниковых сталей. — М.: Металлургия, 1980. — 264 с.
2. Стеблов А.Б., Тимошпольский В.И., Ленартович Д.В. и др. Влияние факторов нагрева на формирование карбидной сетки в стали ШХ15СГ // Литье и металлургия. 2015. № 2 (34). С. 77–80.
3. SEP 1520:98. Микроскопическое исследование структуры карбида, содержащегося в стали, методом последовательности диаграмм. Изд. 3-е. — Изд-во Немецкого института стандартизации, 1998. — 5 с.
4. Воинов С.Г., Шалимов А.Г. Шарикоподшипниковая сталь. — М.: Металлургиздат, 1962. — 480 с.
5. Винокур Б.Б., Пилушенко В.Л., Касаткин О.Г. Структура конструкционной легированной стали. — М.: Металлургия, 1983. — 216 с.
6. Бокштейн Б.С. Атомы блуждают по кристаллу. — М.: Наука, 1984. — 208 с.
7. Чередниченко В.С. Материаловедение. — М.: Омега-Л, 2008. — 752 с.
8. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. Изд. 3-е, переработ. и дополн. — М.: Металлургия, 1983. — 199 с.

Поступила 15 апреля 2021 г.

REFERENCES

1. Spektor A.G., Zel'bert B.M., Kiseleva S.A. *Struktura i svoystva podshpnikovoykh staley* [Structure and properties of bearing steels]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 264 p. (In Russ.).
2. Steblov A.B., Timoshpol'skii V.I., Lenartovich D.V., Gunenkova S.V., Kotov I.V. Influence of heating factors on the formation of carbide mesh in steel ShKh15SG. *Lit'e i metallurgiya*, 2015, no. 2 (34), pp. 77–80. (In Russ.).
3. SEP 1520:98. *Mikroskopicheskoe issledovanie struktury karbida, soderzhashchegosya v stali, metodom posledovatel'nosti diagramm* [SEP 1520:98. Microscopic examination of carbide structure in steels by means of diagram series]. Izd-vo Nemetskogo instituta standartizatsii, 1998, 5 p.
4. Voinov S.G., Shalimov A.G. *Sharikopodshpnikovaya stal'* [Ball bearing steel]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 480 p. (In Russ.).
5. Vinokur B.B., Pilyushenko V.L., Kasatkin O.G. *Struktura konstruktsionnoi legirovannoi stali* [Structural alloy steel structure]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 216 p. (In Russ.).
6. Bokshtein B.S. *Atomy bluzhdayut po kristallu* [Atoms wander around the crystal]. Moscow: Nauka, 1984, 208 p. (In Russ.).
7. Cherednichenko V.S. *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow: Omega-L, 2008, 752 p. (In Russ.).
8. Lakhtin Yu.M. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metallurgy and heat treatment of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 199 p. (In Russ.).

Received April 15, 2021