



The manufacturing data on forming of carbide grid in uninterruptedly-casted ingots of bearing steel ShH15SG depending on technological parameters in preheating and heating furnaces of RUP "BMZ" are given.

А. Б. СТЕБЛОВ, БНТУ, В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, НАН Беларуси,
Д. В. ЛЕНАРТОВИЧ, БНТУ, С. В. ГУНЕНКОВА, И. В. КОТОВ, РУП «БМЗ»

УДК 669.046

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ НАГРЕВА НА ФОРМИРОВАНИЕ КАРБИДНОЙ СЕТКИ В СТАЛИ ШХ15СГ

В 2001 г. на РУП «БМЗ» впервые опробована технология изготовления сортового проката диаметром 80–150 мм из непрерывнолитой заготовки сечением 250х300 и 300х400 мм из стали ШХ15СГ. К 2005 г. выплавлены 63 плавки данной марки стали, которые все были прокатаны на стане 850 и в готовом сорте поставлены на ОАО «Минский подшипниковый завод». Спецификой производства этой марки стали на РУП «БМЗ» является отсутствие печей гомогенизации и возможности ускоренного охлаждения сортового проката после стана.

Любая инструментальная сталь промышленного производства всегда имеет химическую неоднородность из-за наличия дендритной ликвации в непрерывнолитой заготовке. Наряду с тем, что качество проката из стали ШХ15СГ соответствовало ГОСТ 801-78 по макроструктуре, в период освоения технологии наблюдалась карбидная неоднородность на уровне 3–5 баллов в виде карбидной ликвации, карбидной полосчатости и карбидной сетки.

Карбидная ликвация, как было выявлено, зависит от скорости охлаждения непрерывнолитой заготовки после разлива и проявляется в локальных скоплениях карбидов. Это связано с ликвацией углерода и хрома при кристаллизации заготовки. Причем наличие грубых карбидных включений не связано с карбидами ферросплавов, вводимых в сталь, а является продуктом резко выраженной дендритной ликвации в литой заготовке по С и Сг, приводящей к возникновению участков метастабильного ледебурита. В процессе деформации металла они принимают вид грубых строчек карбидов. При пониженной скорости кристаллизации карбидная ликвация проявляется сильнее. После порезки на мерные длины непрерывнолитые заготовки в горячем состоянии складываются в штабель и охлаждаются под колпаками. При низкой скорости охлаждения из аустенитной области ниже линии AC_1 происходит интенсивное выделение карбидов по сечению

заготовки. Таким образом, заготовки при посадке в нагревательную печь, как правило, имеют карбидную ликвацию 4-го балла. Наиболее реальный способ борьбы с карбидной ликвацией, рекомендуемый многими исследователями, заключается в нагреве заготовок и выдержке металла при определенной температуре. Диффузионное растворение карбидной ликвации начинается уже при температуре 1100°C, но процесс при этой температуре протекает медленно. Интенсивное растворение карбидов происходит в интервале 1150–1170°C, когда ледебуритные участки начинают оплаиваться, и встречная диффузия элементов резко возрастает. Однако не рекомендуется нагревать металл выше 1180°C, так как при этом происходит значительное оплавление ледебуритных участков и возникновение в них разрывов металла при прокатке. После отработки режимов нагрева в 2004 г. средний балл по карбидной ликвации составил 1,4.

Карбидная полосчатость наблюдается на продольном микрошлифе в виде чередования темных и светлых полос, ориентированных по направлению прокатки. Образование полосчатости напрямую связано с величиной карбидной ликвации. В подшипниковой стали ликвация углерода и хрома идет одновременно, но карбиды распределяются по объему стали неравномерно, что приводит к дендритной, а в дальнейшем и к полосчатой карбидной неоднородности. Большое влияние на карбидную полосчатость оказывают степень деформации и температурный режим прокатки, а также высокая скорость охлаждения металла после прокатки.

Карбидная сетка окаймляет микрзерна металла сплошным рисунком, но при отжиге она разрушается и растворяется до полного исчезновения. Чем меньше балл карбидной сетки, тем выше качество отожженной стали, лучше ее механическая обрабатываемость и выше стойкость закаленных подшипников. В литературе можно встретить отдельные указания по методам сниже-

ния карбидной сетки, однако практически на каждом металлургическом заводе проводятся самостоятельные исследования, исходя из состава оборудования и особенностей технологии металлургических переделов. Несмотря на достигнутый средний балл 1,8 по карбидной сетке, на некоторых плавках наблюдаются выпадения в образцах до 4–5 баллов. В связи с этим в исследовании карбидной неоднородности главное внимание было уделено изучению влияния параметров технологии нагрева на поведение карбидной сетки в микроструктуре сортового проката.

В работе [1] приведены результаты исследований по нагреву непрерывнолитых заготовок из стали ШХ15СГ в печах стана 850 РУП «БМЗ». Было установлено, что процесс формирования качества начинается уже в подогревательной печи, где в области фазовых превращений в интервале 750–840°C возможно возникновение термических напряжений, приводящих к нарушению сплошности заготовки при прокатке. Одновременно было установлено, что повышение температуры пересадки металла $T_{\text{пн}}$ из подогревательной печи в нагревательную печь с шагающими балками положительно сказывается на снижении карбидной сетки (рис. 1).

В результате статистической обработки данных по факторам нагрева были выявлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на формирование карбидной сетки $KС$. Наиболее значимыми в порядке убывания являются $T_{\text{т}}$ – температура выдержки металла в томильной зоне, °C; $T_{\text{с}}/T_{\text{т}}$ – отношение температуры в сварочной зоне к температуре выдержки в томильной зоне; $Fo = \alpha \tau_{\text{п}} / R^2$ – критерий Фурье, в котором, кроме длительности нагрева $\tau_{\text{п}}$, учитывается приведенный радиус поперечного сечения непрерывнолитой заготовки. Для сечения 250x300 мм $R=0,154$ м, для сечения 300x400 мм $R=0,195$ м.

Для температуры в интервале 1100–1200°C коэффициент температуропроводности $a = 0,0116$ м²/ч [2]. Влияние перечисленных факторов на изменение карбидной сетки $KС$ показано на рис. 2–4.

Получены следующие уравнения:

$$KС = -0,0049T_{\text{пн}} + 5,506, \quad (1)$$

$$KС = 0,0013T_{\text{т}}^2 - 3,1281T_{\text{т}} + 1827,1, \quad (2)$$

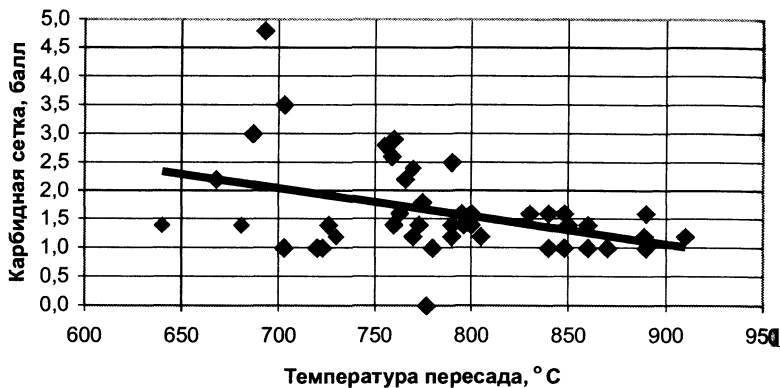


Рис. 1. Влияние температуры пересадки на карбидную сетку

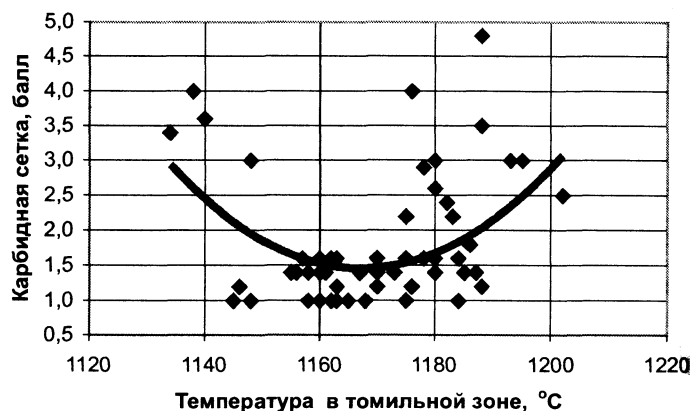


Рис. 2. Влияние температуры выдержки металла в томильной зоне на карбидную сетку

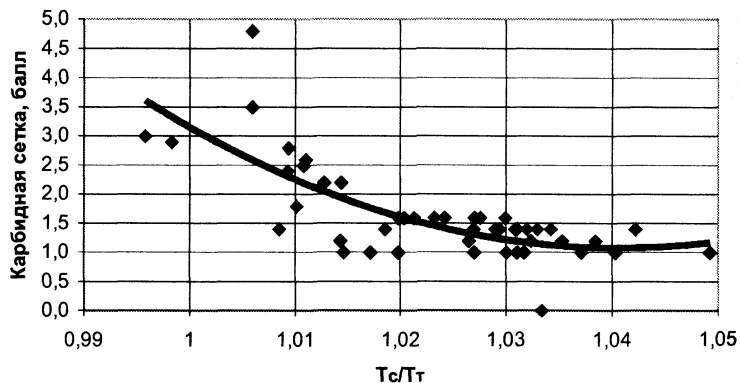


Рис. 3. Влияние отношения температуры в сварочной зоне к температуре выдержки в томильной зоне на карбидную сетку

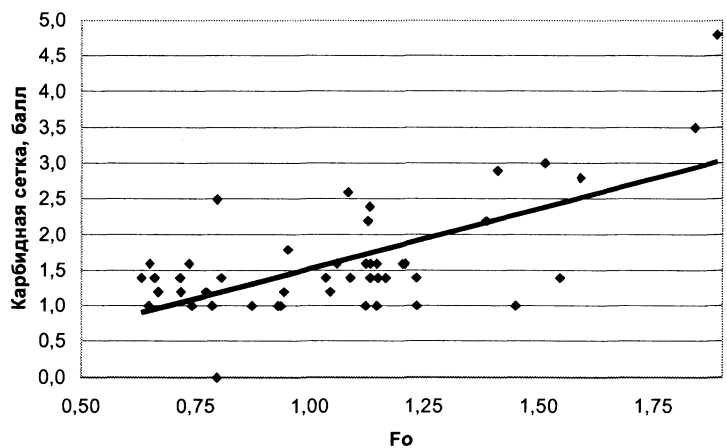


Рис. 4. Влияние продолжительности нагрева (критерий Фурье) на карбидную сетку

$$KC = 1266,3(T_c/T_T)^2 - 2635,1(T_c/T_T) + 1372, \quad (3)$$

$$KC = -0,16 + 1,686 Fo. \quad (4)$$

Как видно из рисунков и уравнений (2) и (3), влияние рассматриваемых факторов на изменение карбидной сетки нелинейно. Очевидно, что влияние длительности нахождения металла в нагревательной печи на карбидную сетку зависит от температуры, при которой металл выдерживается в томильной зоне (рис. 5).

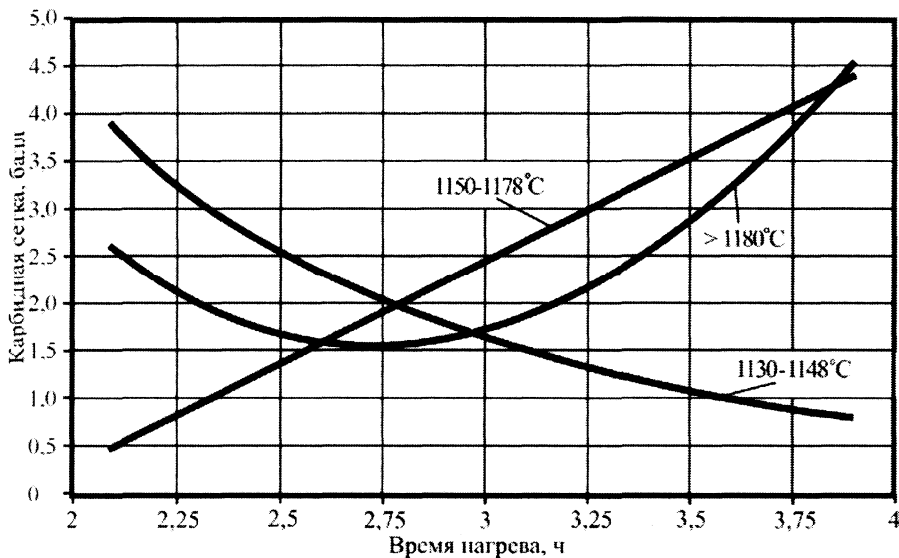


Рис. 5. Влияние длительности нахождения металла в печи на карбидную сетку в зависимости от температуры выдержки металла

В рассмотренной выборке данные были разбиты на три группы: *A* — температура выдержки металла $T_T = 1130-1148^\circ\text{C}$; *B* — температура в интервале $1150-1178^\circ\text{C}$; *C* — температура выдержки более 1180°C .

Из рисунка видно, что в случае нагрева металла при относительно низких температурах (менее 1150°C) при минимальной длительности нагрева металла в печи 2,1 ч $KC=4$ баллам. На практике это наблюдалось на плавках № 31155 и 31156 при нагреве заготовки сечением 250x300 мм с последующей прокаткой на круг диаметром 100 мм на стане 850. При длительности нагрева 3–4 ч происходило растворение карбидной сетки по сечению заготовки, и KC снижалась до 1 балла. Разумеется, нагрев заготовок более 2,5 ч приводит к снижению производительности, поэтому необходимо интенсифицировать процесс нагрева в сварочной зоне, а в томильной зоне выдерживать металл при более высоких температурах. Плавки, выдерживаемые в томильной зоне в интервале *B*, имеют минимальную карбидную сетку — 1,5 балла при общей длительности нагрева в печи $\tau_{\text{п}}=2,75$ ч. При нагреве металла в течение более 3,5 ч карбидная сетка увеличивается в 2 раза (например, плавки № 35009, 31904 и

33187, прокатанные соответственно на круг диаметром 110, 140 и 90 мм).

При интенсивном нагреве металла с высокой температурой посада в нагревательную печь $T_{\text{пн}}=750-800^\circ\text{C}$ и температурой в сварочной зоне $1200-1220^\circ\text{C}$ с дальнейшей выдержкой металла в томильной зоне, при температуре $T_T=1180-1185^\circ\text{C}$ минимальное значение карбидной сетки — 1 балл наблюдается при общей длительности нагрева 2,25 ч (плавки № 33425 и 33426, прокатанные на круг диаметром 80 мм). Дальнейшая выдержка при такой температуре в течение 3 ч и более приводит к интенсивному росту карбидной сетки (плавки № 35009, 32651, 32523 и 31901). Следует заметить, что данные по изменению карбидной сетки могли быть более достоверными при условии оценки влияния длительности выдержки металла в томильной зоне, но этот фактор не фиксировался и может быть оценен только косвенно.

На основе статистической обработки данных, полученных по 63 плавкам, было получено линейное уравнение

регрессии:

$$KC = 43,2 - 1,1 \frac{T_{\text{пн}}}{1000} - 38,9(T_c/T_T) - \frac{0,64T_c}{1000} + 1,3 \frac{\sigma\tau}{R^2}. \quad (5)$$

Полученные статистические зависимости (1)–(5) позволили рекомендовать режимы нагрева непрерывнолитых заготовок из стали ШХ15СГ в условиях стана 850 РУП «БМЗ». Для заготовок сечением 250x300 мм при средней температуре посада металла в нагревательную печь из подогревательной печи 780°C следует установить общую длительность нагрева в интервале 2,3–2,8 ч при температуре в сварочной зоне $T_c=1200-1210^\circ\text{C}$ и в томильной зоне $T_T=1150-1160^\circ\text{C}$. Расчетное значение карбидной сетки KC ожидается в интервале 1,0–1,5 балла. Аналогичные режимы можно предложить для заготовок сечением 300x400 мм с различной температурой посада в нагревательную печь.

Следует отметить, что одним из путей снижения карбидной сетки является оптимизация химического состава и увеличение скорости охлаждения металла после стана. По влиянию химического состава были получены данные, аналогичные выводам в технической литературе. Наименьший балл по карбидной неоднородности наблюдался на плавках с пониженным содержанием углерода и хрома. Вариация карбидной неоднородности в

плавках, содержащих углерод или хром на верхнем или нижнем пределе по ГОСТ 801-78, достигает 0,5 балла. Влияние серы или фосфора на балл по карбидной сетке не обнаружено.

Была предпринята попытка экспериментально доказать влияние температуры конца прокатки на изменение карбидной сетки. С этой целью плавки, выдаваемые из печи при температуре 1170–1180°C, перед станом подстуживали от 30 до 90 с, а также делали паузу от 15 до 30 с в последних четырех проходах. Снижение температуры конца прокатки до 1000–1100°C за счет подстуживания, а также фиксирование температур конца прокатки по всем плавкам не дали статистически значимых сведений о влиянии температуры конца прокатки. В отдельных случаях при прокатке малых диаметров 80–90 мм наблюдалось снижение карбидной сетки при понижении температуры конца прокатки. На наш взгляд, здесь косвенно проявилось увеличение скорости охлаждения металла после прокатки в сравнении с диаметрами 140–150 мм. Одновременно на плавках, прокатанных с подстуживанием, зафиксированы предельные моменты и давление при прокатке заготовок, повышенная зачистка поверхности проката и

брак по трещинам. Производительность стана при этом снижалась на 30–40%.

Выводы

В условиях РУП «БМЗ» освоена промышленная технология производства сортового проката диаметром 80–150 мм из подшипниковой стали ШХ15СГ, обеспечивающая уровень карбидной неоднородности в соответствии с ГОСТ 801-78. Минимальное значение карбидной сетки в прокате наблюдается при температуре посадки заготовок выше 780°C, длительности нагрева металла в печи в интервале 2,3–2,7 ч при температуре в сварочной зоне в интервале 1200–1210°C и температуре в томильной зоне в интервале 1150–1160°C. Температура конца прокатки на изменение карбидной сетки в готовом прокате влияния не оказывает. Минимальное значение карбидной сетки наблюдается при содержании углерода и хрома ниже средних значений по ГОСТ 801-78.

Литература

1. Ящерицын П.И., Тимошпольский В.И., Ленартович Д.В., Стеблов А.Б. Снижение карбидной сетки в стали ШХ15СГ // Докл. НАН Беларуси. 2004. №3. С. 117–121.
2. Велк Г. Формулы для расчета теплофизических свойств стали на ЭВМ // Черные металлы. 1971. №5. С. 48–50.