СНИЖЕНИЕ СТЕПЕНИ КАРБИДНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ЗАЭВТЕКТОИДНЫХ СТАЛЕЙ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

С. А. ЗИНЧЕНКО¹, канд. техн. наук, начальник лаборатории металловедения и термической обработки, zinchenkosa@izhstal.ru; Н. А. ЗОЛОТАРЕВ¹, ведущий инженер лаборатории металловедения и термической обработки; Н. Н. ВАСИЛЬЕВА², старший преподаватель
(¹ ПАО “Ижсталь”, Россия, Удмуртская Республика, г. Ижевск; ² Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, Россия, Удмуртская Республика, г. Ижевск)

Аннотация. При кристаллизации слитка высокоуглеродистых заэвтектоидных сталей, легированных комплексом карбидообразующих элементов, возникает химическая неоднородность — дендритная ликвация, которая является причиной неравномерного распределения карбидной фазы в структуре металла (карбидной неоднородности). Карбидная неоднородность препятствует протеканию процессов коагуляции карбидной фазы при отжиге инструментальных сталей. Показано, что посредством проведения специальной термоциклической обработки в диапазоне относительно невысоких температур отжига можно изменить морфологию и пространственное распределение карбидной фазы, тем самым устранить или существенно снизить карбидную неоднородность в инструментальных сталях. В результате формируется структурное состояние металла, благоприятное для последующей закалки и холодной пластической деформации. В ПАО “Ижсталь” разработана и внедрена в производство технология термоциклической обработки горячего проката из инструментальных сталей. Длительность термоциклической обработки не превосходит длительность традиционного изотермического отжига. Принцип термоциклической обработки заключается в термоциклировании с частичной или полной $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -перекристаллизацией. Инициирование процессов связано с возникновением внутренних напряжений (структурных и термических) и с тепловыми воздействиями. При термоциклической обработке имеют место два основных механизма измельчения карбидных частиц: диспергация крупных карбидов в результате воздействия внутренних структурных растягивающих напряжений, обусловленных многократными полиморфными превращениями, и образование новых зародышей карбидной фазы в аустените при верхних температурах цикла и их коагуляция при последующем охлаждении и выдержке при нижних температурах цикла. Применение термоциклической обработки позволило практически полностью исключить повторные термообработки и обеспечить стабильное получение требуемых характеристик микроструктуры и твердости проката.

Ключевые слова: инструментальные стали, карбидная неоднородность, термоциклическая обработка, распределение карбидной фазы, зернистый перлит, карбидная сетка.

Ссылка для цитирования: Зинченко С.А., Золотарев Н.А., Васильева Н.Н. Снижение степени карбидной неоднородности заэвтектоидных сталей термоциклической обработкой // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 5. С. 477-481.

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-5-477-481

DECREASE OF DEGREE OF CARBIDE NONUNIFORMITY IN HYPEREUTECTOID STEEL BY A THERMOCYCLIC TREATMENT

S. A. ZINCHENKO¹, PhD (Tech.), Head of Lab. “Metal science and thermal treatment”, zinchenkosa@izhstal.ru;
N. A. ZOLOTAREV¹, Leading Engineer of Lab. “Metal science and thermal treatment”;
N. N. VASIL'eva², Senior Teacher
(¹ PJSC “Izhstal”, Russia, Republic of Udmurtiya, Izhevsk; ² Izhevsk State Technical University
after M.T. Kalashnikov, Russia, Republic of Udmurtiya, Izhevsk)

Abstract. During crystallization of an ingot of high-carbon hypereutectoid steels, alloyed by a complex of carbide-forming elements, a chemical nonuniformity arises – a dendrite segregation, which is the reason of nonuniform distribution of carbide phase in the metal structure (carbide nonuniformity). The carbide nonuniformity prevents from the carbide phase coagulation process during annealing of tool steels. It was shown, that it is possible to change the morphology and space distribution of the carbide phase by a special thermocyclic treatment within a range of comparatively low temperatures of annealing, resulting in elimination or significant decrease of the carbide nonuniformity in tool steels. As a result, a structural metal state is formed, favorable for further quenching and cold plastic deformation. At PJSC “Izhstal” a technology of thermocyclic treatment of hot-rolled stock of tool steels has been developed and implemented into production. Duration of thermocyclic treatment does not exceed the duration of regular isothermal annealing. The principle of the thermocyclic treatment is in thermocycling with a partial or complete $\alpha \leftrightarrow \gamma$ recrystallization. Initialization of the processes is connected with internal stresses (both structural and thermal) arising and with heat impact. At the thermocyclic treatment, two basic mechanisms of carbide particles decomposition take place: dispersing of coarse carbides as a result of inter-

nal structural tensile stresses, determined by multiple polymorphous transformations, and forming of carbide phase new nucleuses in austenite at higher temperatures of the cycle and their coagulation at the further cooling and aging at low cycle temperatures. Application of the thermocycling treatment enabled to exclude practically completely the repeated thermal treatments and ensure stable obtaining of required microstructure and hardness characteristics of the rolled products.

Key words: tool steels, carbide nonuniformity, thermocyclic treatment, distribution of carbide phase, grained perlite, carbide mesh.

For citation: Zinchenko S.A., Zolotarev N.A., Vasil'eva N.N. Decrease of degree of carbide nonuniformity in hypereutectoid steel by a thermocyclic treatment. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnikeskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2020, vol. 76, no. 5, pp. 477-481. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2020-5-477-481

Карбидная неоднородность — неравномерное распределение карбидной фазы в структуре металла. Причиной возникновения карбидной неоднородности является возникающая при кристаллизации слитка высокоуглеродистых заэвтектоидных сталей, легированных комплексом карбидообразующих элементов, химическая неоднородность — дендритная ликвация [1]. В процессе нагрева слитков до температуры деформации ледебуритная составляющая не переходит в твердый раствор, и карбидная неоднородность сохраняется. При горячей пластической деформации скопления эвтектических карбидов вытягиваются вдоль направления прокатки и располагаются строчками. При небольших степенях деформации могут сохраняться участки нераздробленной или слабо раздробленной эвтектической сетки. Карбидная неоднородность препятствует протеканию процессов коагуляции карбидной фазы при отжиге инструментальных сталей.

Для придания инструментальной стали структуры зернистого перлита ее подвергают неполному отжигу [2]. Сталь нагревают и выдерживают в межкритическом интервале температур. В этих условиях аустенитизация оказывается неполной. В структуре сохраняется часть нерастворившихся карбидов, которые при дальнейшем перлитном превращении в процессе замедленного охлаждения или выдержки в субкритическом интервале температур играют роль центров кристаллизации и способствуют образованию структуры зернистого перлита. Иногда сфероидизации перлита достигают в результате проведения высокого отпуска, т. е. нагрева и выдержки несколько ниже точки A_{c1} , используя естественное стремление системы переходить от менее равновесных, пластинчатых к более равновесным, зернистым структурам. Однако такая обработка требует значительно большего времени, чем неполный отжиг, и поэтому используется в настоящее время только для калиброванного проката, в котором уже имеется частично или полностью сфероидизированный перлит и термодинамический стимул превращения в виде нагретого состояния металла.

В практике термической обработки горячего проката инструментальной стали не всегда удается получить зернистую структуру перлита по-

сле первого отжига. Приходится проводить повторную термообработку зачастую не один раз. Это приводит к образованию обезуглероженного слоя значительной толщины, потерям металла в окалину, дополнительному расходованию энергии и рабочего времени, снижению производительности. Одной из причин затруднения формирования сфероидальной структуры является наличие оставшихся нераздробленных колоний эвтектических карбидов.

Проведенными ранее исследованиями показана принципиальная возможность модифицирования ледебуритной эвтектики за счет изменения морфологии, состава и распределения по размерам составляющих эвтектику карбидов [3]. Это дает инструмент снижения ликвационной неоднородности заэвтектоидных сталей посредством проведения термической обработки при относительно невысоких температурах отжига.

В ПАО «Ижсталь» разработана и внедрена технология термоциклического сфероидизирующего отжига (ТЦО) горячего проката из инструментальных сталей [4].

Принцип термоциклической обработки (ТЦО) для сфероидизации карбидной фазы заключается в термоциклировании с частичной $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -перекристаллизацией.

Формирование структуры металлов при циклических тепловых воздействиях происходит вследствие развития тех же элементарных процессов образования, перераспределения и аннигиляции дефектов кристаллического строения, которые характерны для статических условий механического и теплового нагружения [5]. Инициирование процессов связано с возникновением внутренних напряжений (структурных и термических) и с тепловыми воздействиями.

Цель циклов нагрева $\leftrightarrow$ охлаждения — измельчить частицы карбидной фазы за счет внутренних структурных растягивающих напряжений, обусловленных многократными полиморфными превращениями, а также провести их сфероидизацию и более полный распад твердого раствора посредством интенсификации диффузионных процессов.

Особенностью разработанных режимов является комбинация ТЦО с выдержками при максимальной температуре изотермического отжига, при которой происходит зарождение множества

центров конденсации вторичной карбидной фазы за счет постоянного градиента температуры, и последующей выдержки в интервале перлитного распада для роста и коагуляции карбидной фазы.

При ТЦО имеют место два основных механизма измельчения карбидных частиц: диспергация крупных карбидов в результате воздействия внутренних структурных растягивающих напряжений, обусловленных многократными полиморфными превращениями, и образование новых зародышей карбидной фазы в аустените при верхних температурах цикла и их коагуляция при последующем охлаждении и выдержке при нижних температурах цикла.

ТЦО по сравнению с изотермическим отжигом вызывает эффект большего диспергирования, сфероидизации и увеличения однородности распределения карбидных частиц. Образующиеся после такой обработки карбиды имеют сферическую форму, однородны по размерам и равномерно распределены в матрице. Вследствие этого твердость проката по сравнению с традиционным изотермическим отжигом ниже на 20–40 НВ.

В силу особенностей легирования инструментальные марки стали различаются, порой значительно, по положению критических точек, ширине интервала перлитного превращения, кинетике перлитного распада. Вообще говоря, для каждой марки стали существует свой оптимальный температурно-временной режим отжига. Вместе с тем в процессе термоциклирования температура металла непрерывно изменяется. Поэтому даже не при самом удачном выборе интервала циклирования металл в какой-то момент времени попадает в интервал минимальной устойчивости аустенита. Этого времени оказывается достаточно для формирования благоприятной морфологии карбидной фазы.

Эксперименты показали, что практически полная сфероидизация карбидной фазы происходит после проведения третьего–четвертого цикла отжига [6]. Увеличение числа циклов выше пяти не сопровождается заметными изменениями структурного состояния. Длительность ТЦО соответствует продолжительности стандартного изотермического отжига.

Следует отметить, что эффект ТЦО в сталях с высоким содержанием кремния и вольфрама проявляется в меньшей степени. Но стали такого состава и при обычном отжиге менее склонны к разупрочнению и сфероидизации карбидной фазы. Из изготавливаемых в настоящее время ПАО “Ижсталь” сталей наименьшую склонность к сфероидизации проявляет сталь S5.

Режимы неполного (изотермического) отжига и ТЦО стали S5 приведены на рис. 1. Длительность изотермического отжига составляет 29 ч,

ТЦО — 26 ч. Микроструктура проката из стали S5 после обычного изотермического отжига и после термоциклирования приведена на рис. 2.

Рис. 1. Режимы отжига стали S5:
а — неполный отжиг; б — термоциклическая обработка

Fig. 1. Annealing modes of steel S5:
а — incomplete annealing; б — thermo-cyclic treatment

Рис. 2. Микроструктура отожженного проката стали S5, $\times 800$:
а — изотермический отжиг;
б — термоциклическая обработка

Fig. 2. Microstructure of annealed rolled product of steel S5, $\times 800$:
а — isothermal annealing; б — thermo-cyclic treatment

До внедрения технологии ТЦО усредненные по году показатели качества горячего проката инструментальных сталей (доля партий проката, не сданных с первого предъявления по микроструктуре и твердости) составляли:

— ШХ15, ШХ15СГ, У8, У8А, У9, У9А, У12, У12А по микроструктуре — 61,83 %, по твердости — 17,24 %;

– О1, S5: ~100 % по обоим показателям.

Внедрение ТЦО позволило практически полностью исключить повторные термообработки и обеспечить стабильное получение микроструктуры и твердости проката инструментальных сталей, а для сталей О1, S5 ТЦО является единственно возможным вариантом обеспечения требуемых характеристик.

Разновидностью карбидной неоднородности является карбидная сетка (цементитная сетка в случае инструментальной нелегированной стали). Карбидная сетка обусловлена выделением заэвтектоидных карбидов по границам зерен аустенита при недостаточно быстром охлаждении металла после горячей прокатки. Наиболее опасным для образования карбидной сетки является интервал температур 850–675 °С. Ускоренное охлаждение проката в указанном интервале температур позволяет предотвратить выделение карбидной сетки.

При производстве горячего проката не всегда удается обеспечить достаточную для подавления образования карбидной сетки скорость охлаждения проката. Выделившиеся по границам зерен карбиды сохраняют свое положение при последующих смягчающей термообработке и холодной деформации. Это существенно ограничивает запас пластичности металла и препятствует проведению холодной деформации заготовки на метизном переделе.

В ПАО «Ижсталь» разработана и внедрена в производство технология ТЦО, направленная на устранение цементитной сетки в инструментальных сталях.

Особенностью разработанного термоциклического режима является комбинация термической обработки с выдержками в аустенитной области температур и термической обработки в интервале перлитного распада [7].

Температурно-временные параметры термоциклирования: нагрев в течение 6 ч до температуры 860 °С, выдержка 2 ч, охлаждение до 660 °С, выдержка 2 ч, нагрев до 860 °С, выдержка 2 ч, охлаждение до 660 °С, выдержка 2 ч. Промежуточное охлаждение с температуры 860 °С до температуры 660 °С и нагрев с 660 до 860 °С осуществляли за 2 ч. После проведения трех циклов нагрева садку проката выгрузили из печи. Дальнейшее охлаждение производили на спокойном воздухе. Увеличение циклов нагрева свыше трех не сопровождается заметными структурными изменениями.

График режима ТЦО представлен на рис. 3. Длительность ТЦО составляет ~24 ч.

Рис. 3. Режим термоциклического отжига стали У12А

Fig. 3. The mode of thermo-cyclic annealing of steel У12А

Промышленное опробование ТЦО проводилось на мотках катанки Ø11,5 мм из стали У12А. 64 мотка плавки 1Т33988 общей массой 28,8 т и 32 мотка плавки 1Т33989 общей массой 14,4 т подвергались ТЦО по разработанному режиму.

Наблюдения микроструктуры свидетельствуют, что в результате термоциклирования произошло растворение выделений карбидов по границам зерен (рис. 4).

Рис. 4. Цементитная сетка в стали У12А, ×250:

а — после горячей прокатки;
б — после термоциклической обработки

Fig. 4. Cementite net in steel У12А, ×250:

а — after hot rolling; б — after thermo-cycling treatment

Степень развития цементитной сетки уменьшилась с 4–5 баллов в исходном состоянии до 2 баллов после проведения ТЦО. Это обеспечило приемлемую технологичность при изготовлении калиброванного проката для сердечников.

Заключение

1. На основе исследования закономерностей фазовых и структурных превращений в области температур выделения и коагуляции карбидной фазы при термоциклическом воздействии разработаны и внедрены в производство режимы ТЦО проката инструментальных сталей.

2. Длительность ТЦО не превосходит длительность традиционного изотермического отжига.

3. Применение ТЦО позволило практически полностью исключить повторные термообработки и обеспечить стабильное получение требуемых характеристик микроструктуры и твердости проката.

4. Термоциклирование снижает степень развития цементитной сетки в стали У12А на 2–3 балла, что обеспечивает технологическую пластичность проката на метизном переделе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голиков И.Н., Масленков С.Б. Дендритная ликвация в сталях и сплавах. — М.: Металлургия, 1977. С. 203–216.
2. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: справ. изд. в 3-х т. // Бернштейн М.Л., Курдюмов Г.В., Меськин В.С. и др.; Под общей ред. Рахштадта А.Г., Капусткиной Л.М., Прокошкина А.В. и др. Т. 3. С. 15.
3. Zinchenko S.A. Thermocyclic treatment (TCT) – as a method to decrease carbide segregation of hypereutectoid steels // *European Physical Journal Special Topics*. 2020. V. 229. P. 459–465.
4. Зинченко С.А. Разработка и внедрение в ОАО «Ижсталь» термоциклической обработки инструментальных сталей // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2015. № 5. С. 48–50.
5. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин. — Л.: Машиностроение: ленинградское отделение, 1989. — 257 с.
6. Зинченко С.А., Ибрагимов А.У. Термоциклический сфероидизирующий отжиг подшипниковой стали // *Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. научн. тр. XII Междунар. научно-практич. конф. 19–20 марта 2015 г. в 4 т. Т. 2*. 2015. С. 144–147.
7. Зинченко С.А., Золотарев Н.А. Устранение цементитной сетки в инструментальных сталях посредством проведения термоциклической обработки // *Перспективы развития металлургических технологий: сб. тезисов XI конф. молодых специалистов*. — М.: ГКНЦ ФГУП «ЦНИИЧМ им. И.П. Бардина», 2020. С. 30.

Поступила 16 марта 2020 г.

REFERENCES

1. Golikov I.N., Maslenkov S.B. *Dendritnaya likvatsiya v stalyakh i splavakh* [Dendrite segregation in steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1977, pp. 203–216. (In Russ.).
2. Bernstein M.L., Kurdyumov G.V., Mes'kin V.S. etc. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali i chuguna* [Metal science and thermal treatment of steel and cast iron]; ed. by Rakhstadt A.G., Kaputkina L.M., Prokoshkina A.V. etc. V. 3, p. 15. (In Russ.).
3. Zinchenko S.A. Thermocyclic treatment (TCT) – as a method to decrease carbide segregation of hypereutectoid steels. *European Physical Journal Special Topics*, 2020, v. 229, pp. 459–465.
4. Zinchenko S.A. Elaboration and implementation at OJSC «Izhstal» thermo-cyclic treatment of tool steels. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2015, no. 5, pp. 48–50. (In Russ.).
5. Fedyukin V.K., Smagorinsky M.E. *Termotsiklicheskaya obrabotka metallov i detalei mashin* [Thermo-cyclic treatment of metals and details of machines]. L.: Mashinostroyeniye: leningradskoe otdeleniye, 1989, 257 p. (In Russ.).
6. Zinchenko S.A., Ibragimov A.U. Thermo-cyclic spheroidizing annealing of bearing steel. *Sovremennyye instrumental'nye sistemy, informatsionnyye tekhnologii i innovatsii: sb. nauchn. tr. XII Mezhdunar. nauchno-praktich. konf. 19–20 marta 2015 g. v 4 t.* [Modern tool systems, information technologies and innovations], 2015, v. 2, pp. 144–147. (In Russ.).
7. Zinchenko S.A., Zolotarev N.A. *Ustraneniye tsementitnoi setki v instrumental'nykh stalyakh posredstvom provedeniya termotsiklicheskoi obrabotki* [Elimination of cementite net in tool steels by thermo-cyclic treatment]. *Perspektivy razvitiya metallurgicheskikh tekhnologii: sb. tezisov XI konf. molodykh spetsialistov*. Moscow: GKNTs FGUP «TsNIChM im. I.P. Bardina», 2020, p. 30. (In Russ.).

Received March 16, 2020