

УДК 669.1.017:669.112.227.3:621.771.2

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ АУСТЕНИТИЗАЦИИ НА ДИСПЕРСНОСТЬ ПЕРЛИТА УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

ПАРУСОВ Э. В.¹, *к.т.н., с.н.с.*,
ПАРУСОВ В. В.¹, *д.т.н., проф.*,
САГУРА Л. В.^{2*}, *к.т.н.*

¹ Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова. 1, г. Днепропетровск, Украина, +380 56 776 82 28, e-mail : tometal@ukr.net, ORCID : 0000-0002-4560-2043, ORCID : 0000-0003-3700-4956

^{2*} Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, пл. Академика Стародубова. 1, г. Днепропетровск, Украина, +38 056 233 71 63, e-mail: slv_metal@mail.ru, ORCID : 0000-0002-2614-0322

Показано влияние температуры аустенизации на дисперсность перлита углеродистой стали. Дисперсность перлита углеродистых сталей зависит от величины аустенитного зерна, от которой зависит устойчивость аустенита, и ряда других факторов. Влияние величины зерна на дисперсность перлита проявляется благодаря уменьшению зернограничной поверхности и, следовательно, энергии границ аустенита. С повышением температуры аустенизации увеличивается количество специальных границ, что также приводит к снижению энергии границ. Также показано, что при повышении температуры аустенизации проявляется действие теплотехнических факторов. К важнейшему из этих факторов относится повышение фактической скорости охлаждения в подкритическом интервале температур (700-720 °С) при повышении температуры аустенизации. Влияние температуры аустенизации на фактическую скорость охлаждения в подкритическом интервале температур можно также показать, если рассматривать процессы охлаждения металлопроката с применением теории регулярного режима. При регулярном режиме охлаждения прокат охлаждается с максимальной скоростью. Наступление регулярного режима в интервале температур феррито-перлитного превращения происходит при повышении температуры аустенизации, а для бейнитного и мартенситного интервалов температур фактическая скорость охлаждения практически не зависит от этого фактора. Регулярный режим охлаждения наступает при условии, что критерий Фурье равен или больше числа 0,25. Если повысить температуру аустенизации, то время установления регулярного режима не изменится, поскольку оно определяется физическими и геометрическими характеристиками металлопроката. При выборе режима охлаждения стальных изделий со специального нагрева следует учитывать фактическую скорость охлаждения в феррито-перлитном интервале, которая может быть значительно меньше максимально возможной скорости при этих температурах. Как правило, фактическая скорость охлаждения в феррито-перлитном интервале увеличивается при повышении температуры аустенизации, а в бейнито-мартенситном интервале фактическая скорость охлаждения практически не зависит от этого фактора.

Ключевые слова: углеродистая сталь; температура аустенизации; дисперсность перлита; регулярный режим

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ АУСТЕНІТИЗАЦІЇ НА ДИСПЕРСНІСТЬ ПЕРЛІТУ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ

ПАРУСОВ Е. В.¹, *к.т.н., с.н.с.*,
ПАРУСОВ В. В.¹, *д.т.н., проф.*,
САГУРА Л. В.^{2*}, *к.т.н.*

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова. 1, м. Дніпропетровськ, Україна, +380 56 776 82 28, e-mail : tometal@ukr.net, ORCID : 0000-0002-4560-2043, ORCID : 0000-0003-3700-4956

^{2*} Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова. 1, м. Дніпропетровськ, Україна, +38 056 233 71 63, e-mail: slv_metal@mail.ru, ORCID : 0000-0002-2614-0322

Показано вплив температури аустенізації на дисперсність перліту вуглецевої сталі. Дисперсність перліту вуглецевих сталей залежить від величини аустенитного зерна, від якої залежить стійкість аустеніту, і ряду інших факторів. Вплив розміру зерна на дисперсність перліту проявляється завдяки зменшенню зернограничної поверхні і, отже, енергії границь аустеніту. З підвищенням температури аустенізації збільшується кількість спеціальних границь, що також призводить до зниження енергії границь. Також показано, що при підвищенні температури аустенізації проявляється дія теплотехнічних факторів. До найважливішого з цих чинників відноситься підвищення фактичної швидкості охолодження в подкритическом інтервалі температур (700-720 °С) при підвищенні температури аустенізації. Вплив температури аустенізації на фактичну швидкість охолодження в підкритичному інтервалі температур можна також показати, якщо розглядати процеси

охолодження металопрокату з застосуванням теорії регулярного режиму. При регулярному режимі охолодження прокат охолоджується з максимальною швидкістю. Настання регулярного режиму в інтервалі температур феррито-перлитного перетворення відбувається при підвищенні температури аустенізації, а для бейнітного і мартенситного інтервалів температур фактична швидкість охолодження практично не залежить від цього фактору. Регулярний режим охолодження настає за умови, коли критерій Фур'є дорівнює або більше числа 0,25. Якщо підвищити температуру аустенізації, то час встановлення регулярного режиму не зміниться, оскільки він визначається фізичними та геометричними характеристиками металопрокату. При виборі режиму охолодження сталевих виробів зі спеціального нагріву слід враховувати фактичну швидкість охолодження у феррито-перлитному інтервалі, яка може бути значно менше максимально можливої швидкості при цих температурах. Як правило, фактична швидкість охолодження в феррито-перлитному інтервалі збільшується при підвищенні температури аустенізації, а в бейніто-мартенситному інтервалі фактична швидкість охолодження практично не залежить від цього фактору.

Ключові слова: вуглецева сталь; температура аустенізації; дисперсність перліту; регулярний режим

EFFECTS OF TEMPERATURE OF AUSTENITIZATION ON THE DISPERSION OF THE PEARLITE CARBON STEEL

PARUSOV E. V.¹, *Cand. of Tech Sci., Senior Researcher,*

PARUSOV V. V.¹, *Dr. of Tech. Sci., Prof.,*

SAHURA L. V.^{2*} *Cand. of Tech Sci.*

¹ Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of National academy of sciences of Ukraine, Academic area Starodubova, 1, Dnipropetrovsk, Ukraine, +380 56 776 82 28, e-mail : tometal@ukr.net, ORCID : 0000-0002-4560-2043, ORCID : 0000-0003-3700-4956

^{2*} Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy of National academy of sciences of Ukraine, Academic area Starodubova, 1, Dnipropetrovsk, Ukraine, +38 056 233 71 63, e-mail: slv_metal@mail.ru, ORCID : 0000-0002-2614-0322

Shows the effect of temperature austenitization on the dispersion of the pearlite carbon steel. The dispersion of pearlite in carbon steels depends on the size of austenitic grains, which determines the stability of the austenite, and a number of other factors. The influence of grain size on the dispersion of perlite is manifested through the reduction of the grain boundary surface and, consequently, the energy boundaries of the austenite. With increasing temperature austenitization increases the number of special boundaries, which also leads to lower energy boundaries. It is also shown that with increasing temperature austenitization shows the effect of thermal factors. The most important of these factors include the actual increase of the cooling rate in the subcritical temperature range (700-720 °C) with increasing temperature, austenitization. The effect of temperature of austenitization on the actual cooling rate in the subcritical temperature range can also be displayed, if the processes of rolled steel with the application of the theory of regular mode. With regular cooling mode, the rolled steel is cooled at maximum speed. The onset of the regular mode in the temperature range of ferrite-pearlite transformation occurs at higher temperature austenitization, and for bainite and martensitic temperature actual cooling rate is practically independent of this factor. Regular cooling mode occurs, provided that the criterion of the Fourier equal to or greater than the number of 0,25. If you raise the temperature of austenitization, while establishing a regular mode will not change because it is determined by the physical and geometrical characteristics of the rolled steel. When selecting the cooling mode of steel products with special heating should take into account the actual cooling rate in ferrite-pearlite spacing, which may be significantly less than the maximum possible rate at these temperatures. Usually, the actual cooling rate in ferrite-pearlite spacing increases with increasing temperature, austenitization, and in bainite-martensitic interval the actual cooling rate is practically independent of this factor.

Key terms: carbon steel; temperature austenitization; dispersion of perlite; regular mode

Одной из важнейших характеристик углеродистой стали, в частности, для производства катанки, является дисперсность перлита (межпластиночное расстояние), поскольку она определяет комплекс механических свойств и технологичность (деформируемость) при волочении [1...3].

Механизм образования пластинчатого перлита, по своей природе, является дислокационным и выявляет генетическую связь между субструктурой переохлажденного аустенита и морфологией перлита [4, 5]: зародыши цементита пластинчатого перлита возникают на регулярных плоскополигональных стенках, возникающих в аустените из-за

термопластической деформации, обусловленной охлаждением.

Известно, что дисперсность перлита углеродистых сталей зависит от величины аустенитного зерна и ряда других факторов, в частности, от температуры аустенитизации [6].

Важно отметить, что влияние величины зерна на дисперсность перлита проявляется благодаря уменьшению зернограничной поверхности и, следовательно, энергии границ аустенита. Как установлено в работе [7], с повышением температуры аустенитизации увеличивается количество

спеціальних границ, що також приводить к снижению енергії границ.

Таким образом, повышение температуры аустенитизации стали приводит к увеличению величины зерна и формированию большего количества специальных границ, что при прочих равных условиях приводит к повышению устойчивости аустенита и, следовательно, дисперсности перлита.

Авторы [8, 9] считают ошибочным мнение об увеличении скорости охлаждения при повышении температуры нагрева (аустенитизации) и объясняют этот факт только изменением химической и физической структуры аустенита. По мнению этих авторов, повышение температуры аустенитизации обуславливает лучшую гомогенизацию и способствует уменьшению концентрационных флуктуаций, которые могут способствовать образованию зародышей при превращении в перлитной области. Этой точки зрения придерживаются многие исследователи.

Менее известным является то, что при повышении температуры аустенитизации проявляется действие чисто теплотехнических факторов. К важнейшему из этих факторов относится повышение фактической скорости охлаждения при температуре 700-720 °С, если увеличивать температуру нагрева.

Впервые изучил влияние температуры аустенитизации на фактическую скорость охлаждения Г. Френч (рис. 1) [10]. Им было установлено, что если температура аустенитизации составляет 800, 900 и 1050 °С, то скорость охлаждения в воде при 720 °С соответственно равна 146, 186 и 200 %/сек. Аналогичные результаты получены при охлаждении в масле, однако, влияние температуры аустенитизации на скорость охлаждения при 720 °С менее выражено, чем при охлаждении в воде.

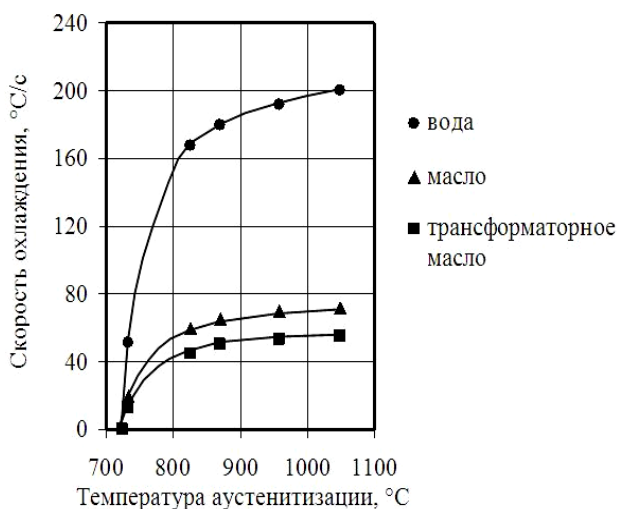


Рис. 1. Влияние температуры аустенитизации на скорость охлаждения сердцевин при 720 °С / The influence of the temperature of austenitization on the cooling rate of the core at 720 °С

Влияние температуры аустенитизации на фактическую скорость охлаждения в подкритическом интервале температур можно также показать при рассмотрении процесса охлаждения металлопроката с применением теории регулярного режима [11, 12]. Регулярным режимом охлаждения называют такой период охлаждения, когда изменение избыточной температуры в теле не зависит от первоначального распределения температур.

Как видно из рис. 2, изменение температуры в центре образца диаметром 110 мм из стали 45 имеет два различных участка. Верхний участок (до точки «а») характеризуется незначительной скоростью охлаждения, которая постепенно возрастает и в точке «а» приобретает максимально возможное значение, что свидетельствует о наступлении регулярного режима охлаждения.

Известно [13], что регулярный режим охлаждения наступает при условии, когда критерий Фурье (безразмерное время) равен или больше 0,25, т.е.:

$$F_0 = \frac{a\tau}{r^2} \geq 0,25$$

где a – коэффициент температуропроводности; τ – время охлаждения; r – наружный радиус охлаждаемого проката.

Следовательно, если повысить температуру аустенитизации, то безразмерное время установления регулярного режима не изменится, поскольку оно определяется физическими и геометрическими характеристиками стального тела.

Неизменность времени, необходимого для установления регулярного режима, обусловит приближение точки «а» к условной критической температуре (A_3), а при более значительных температурах нагрева образца точка «а» может находиться даже выше условной критической температуры.

Поэтому, когда регулярный режим охлаждения наступает выше точки A_3 , дальнейшее повышение температуры не сказывается на скорости охлаждения при 720 °С. Под этим углом зрения и следует рассматривать данные, полученные Г. Френчем.

Особенно ощутимо проявляется действие температуры нагрева как фактора, влияющего на фактическую скорость охлаждения при повышенных температурах, если охлаждение стали производится со специального нагрева. Известно, что температура аустенитизации не должна значительно превышать верхнюю критическую точку стали [14]. Обычно, эта температура превышает верхнюю критическую температуру стали на 50 °С.

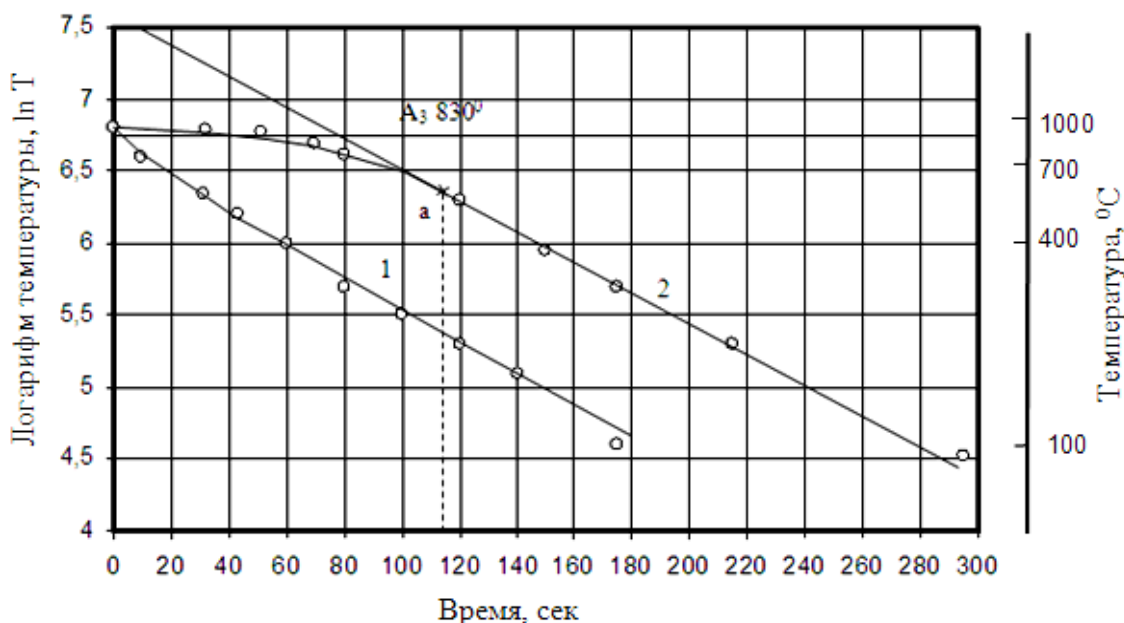


Рис. 2. Зависимость натурального логарифма температуры проката диаметром 110 мм от времени охлаждения в воде: 1 – изменение температуры на расстоянии 9 мм от поверхности; 2 – изменение температуры в центре образца / The dependence of the natural logarithm of the temperature of the rolled diameter of 110 mm from the cooling time in water: 1 – change temperature at a distance of 9 mm from the surface; 2 – the temperature change in the center of the specimen

Таким образом, при выборе режима охлаждения металлопроката со специального нагрева следует учитывать фактическую скорость охлаждения в феррито-перлитном интервале, которая может быть значительно меньше максимально возможной скорости при этих температурах. Как правило, фактическая скорость охлаждения в феррито-перлитном интервале увеличивается при повышении температуры аустенитизации, а для бейнитного и мартенситного интервалов температур фактическая скорость охлаждения практически не зависит от этого фактора.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Парусов Э. В. Оптимальные характеристики качества катанки из высокоуглеродистой стали / Э. В. Парусов, В. В. Парусов, В. А. Луценко [и др.] // Метизы (Р. Ф.). – 2006. – № 3. – С. 34-36.
2. Парусов Э. В. Требования, предъявляемые к катанке для производства высокопрочной канатной арматуры / Э. В. Парусов // Теория и практика металлургии. – 2014. – № 1-2 (96-97). – С. 67-70.
3. Парусов Э. В. Влияние особенностей строения и дисперсности перлита на свойства углеродистой стали / Э. В. Парусов, Л. В. Сагура // XIII-я Всеукраинская научно-практическая конференция «Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра», НТУУ «КПИ», Киев, 2015. – С. 698-708. <http://www.fhotm.kpi.ua/labours/labours-2015.pdf>.

Parusov E. V. The influence of the characteristics of the structure and dispersion of perlite on the properties of carbon steel / E. V. Parusov, L. V. Sahura // XIII all-Ukrainian scientific-practical conference "Special metallurgy: yesterday, today, tomorrow", NTUU "KPI", Kyiv, 2015. – P. 698-708. <http://www.fhotm.kpi.ua/labours/labours-2015.pdf>.

4. Парусов В. В. Морфологические особенности перлита при превращениях гомогенного аустенита / В. В. Парусов // Сб. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Днепропетровск: Визион. – 1998. – Вып.2. – С. 355-364.

Parusov V. V. Morphological characteristics of perlite in the homogeneous transformations of austenite / V. V. Parusov, in proc. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy. – Dnepropetrovsk: Vision. – 1998. – Vol.2. – P. 355-364.

5. Губенко С. И. Деформация металлических материалов / С. И. Губенко, В. В. Парусов. – Днепропетровск: Арт-пресс, 2006. – 316 с.

Gubenko S. I. Deformation of metallic materials / S. I. Gubenko, V. V. Parusov. – Dnepropetrovsk: Art press, 2006. – 316 p.

6. Влияние величины зерна и других факторов на дисперсность перлита углеродистых сталей / В. В. Парусов, Э. В. Парусов, Л. В. Сагура, О. В. Парусов, И. Н. Чуйко // Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ПГАСА, 2014. – Вып. 73. – С. 186-190.

The influence of grain size and other factors on the dispersion of pearlite in carbon steels / V. V. Parusov, E. V. Parusov, L. V. Sahura, O. V. Parusov, I. N. Chuyko // Construction, materials science and engineering : Proc. sci. Tr. – Dnepropetrovsk: PHASA, 2014. – Vol. 73. – P. 186-190.

7. Парусов В. В. Влияние режимов термомеханической обработки на формирование специальных границ в катанке из низкоуглеродистой стали / В. В. Парусов, Г. Д. Сухомлин, Л. В. Сагура, Э. В. Парусов, А. И. Сивак // Строительство, материаловедение, машиностроение : Сб.

научн. тр. – Днепропетровск: ПГАСА, 2012. - Вып. 64. – С. 238 - 242.

Parusov V. V. Influence of thermomechanical treatment on the formation of special boundaries in wire rod mild steel / V. V. Parusov, G. D. Sukhomlin, L. V. Sahura, E. V. Parusov, A. I. Sivak // Construction, materials science and engineering : Proc. sci. Tr. – Dnepropetrovsk: PHASA, 2012. - Vol. 64. P. 238 - 242.

8. Меськин В.С. Основы легирования стали / В. С. Меськин – М.: Metallurgy, 1964. – 684 с.

Meskin V. S. Fundamentals of alloying of steel / V. S. Meskin – М.: Metallurgy, 1964. – 684 p.

9. Гудремон Э. Специальные стали. Т. 2 / Э. Гудремон. – М.: Metallurgy, 1966. – 540 с.

Gudremon E. Special steel. Vol. 2 / E. Gudremon. – М.: Metallurgy, 1966. – 540 p.

10. Френч Г. Закалка стали / Г. Френч – М.: Гонти, 1933.

French G. Hardening steel / G. French, М.: Shingles, 1933.

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. Вергун А. С. (Украина); д-ром техн. наук, проф. Большаковым Вад. И. (Украина)

Поступила в редакцию 06.05.2015

11. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим / Г. М. Кондратьев – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 408 с.

Kondrat'ev G. M. Regular thermal mode / G. M. Kondrat'ev, М.: National publishing house of technical-theoretical literature, 1954. – 408 p.

12. Исаченко В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Энергия. – 1965. – 488 с.

Isachenko V. P. Heat transfer / V. P. Isachenko, V. A. Osipova, A. S. Sukomel. – Energy. – 1965. – 488 p.

13. Тайц Н. Ю. Технология нагрева стали / Н. Ю. Тайц – М.: Metallurgizdat, 1962. – 451 с.

Taits N. Y. Heating technology steel / N. Y. Taits – М.: Metallurgizdat, 1962. – 451 p.

14. Гуляев А. П. Metallovedenie / А. П. Гуляев – М.: Metallurgy, 1986. – 542 с.

Gulyaev A. P. Metallography / A. P. Gulyaev – М.: Metallurgy, 1986. – 542 p.