

7. Geminov V.N. Generalized function for fatigue damage accumulation / V.N. Geminov, V.S. Balyberdin // Fatigue and fracture toughness of metals. – М. : Nauka, 1974. – P. 171-180. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.04.2015

УДК 669.112.227.1

© Хлестов В.М.¹, Якушечкина Л.И.², Щеглова А.М.³

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРЕВА НА ТОЧКУ A_{C3} И НА РАЗМЕР ЗЕРНА АУСТЕНИТА

Исследования выполнены на универсальной установке скоростного непосредственного электронагрева с одновременной регистрацией дилатометрической и термической кривых нагрева стали Ст6. Изучали влияние скорости нагрева от 0,1 до 30°C/c на положение точки A_{C3} , размер начального зерна аустенита и рост аустенитного зерна при нагреве до 1000°C. Точку A_{C3} определяли на дилатометрической и термической кривых и уточняли металлографически на оптическом и электронном микроскопах. Точка A_{C3} повышается при увеличении скорости нагрева от 0,1 до 10°C/c примерно на 40°C, а размер начального аустенитного зерна, наоборот, значительно уменьшается. Наиболее интенсивно аустенитное зерно растёт при медленном повышении температуры нагрева до 1000°C.

Ключевые слова: начальное зерно аустенита, скорость непосредственного электронагрева, изотермический рост зерна аустенита, изотермическая выдержка.

Хлестов В.М., Якушечкина Л.И., Щеглова Г.М. Вплив швидкості нагріву на точку A_{C3} і на розмір зерна аустеніту. Дослідження виконані на універсальній установці швидкісного безпосереднього електронагріву з одночасною реєстрацією дилатометричної і термічної кривих нагрівання сталі Ст6. Досліджували вплив швидкості нагріву від 0,1 до 30°C/c на положення точки A_{C3} , розмір початкового зерна аустеніту і зростання аустенітного зерна при нагріванні до 1000°C. Точку A_{C3} визначали на перегінах дилатометричної і термічної кривих і уточнювали металлографічним методом на оптичному та електронному мікроскопах. Точка A_{C3} підвищується при збільшенні швидкості нагріву від 0,1 до 10°C/c приблизно на 40°C, а розмір початкового аустенітного зерна, навпаки, значно зменшується. Найбільш інтенсивно аустенітне зерно росте при повільному підвищенні температури нагріву до 1000°C.

Ключові слова: початкове зерно аустеніту, швидкість безпосереднього електронагрівання, ізотермічний зростання зерна аустеніту, ізотермічна витримка.

V.M. Khlestov, L.I. Yakushechkina, G.M. Shcheglova. The influence of the heating rate on the point A_{C3} and on austenite grain growth. In the work the influence of the heating rate, temperature and soaking time in γ -area upon austenite grain growth in Ct6 steel of standard composition was investigated in this work. The experiments were carried out at the installation for complex investigations of alloys over a wide range of electric heating rate for the specimens of 10mm in diameter and 50mm long. Changes in the specimens' temperature and length were registered. The critical point A_{C3} was deter-

¹ канд. техн. наук, доцент ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² канд. техн. наук, доцент ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ инженер, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь,
anna_shseglova.pstu@gmail.com

mined by the inflection of the dilatometer curve and then it was defined more accurately metallographically using optical and electronic microscopes. A_{C3} point, determined by the dilatometer curve proved not to show austenite forming completion precisely. The metallographic method made it possible to establish that there still remained 1,5-2,0% of ferrite, which dissolves in austenite completely at subsequent temperature raise by 10-15°C at increased and high heating rates. Original austenite grain, which is formed after the temperature has reached $A_{C3} + 10-15^\circ\text{C}$ depends substantially upon the heating rate within 0,1-5°C interval. Subsequent acceleration of the cooling rate up to 10-30°C/sec has practically no influence upon the original grain, which remains at 10 μm level. With temperature growth from A_{C3} point to 1000°C the original austenite grain grows mostly at low heating rate (0,1°C/sec). An increase of the heating rate up to 5-30°C/sec results in substantial deceleration of grain growth. Isothermal soaking enlarges austenite grain the more, the more is the soaking temperature. At 1000°C and 20 minutes' soaking time the grain size is twice as big as that at 950°C. Austenite grain grows even less when the soaking time is 900°C.

Keywords: primary austenite grain, speed direct electric heating, isothermal austenite grain growth, isothermal soaking, original austenite grain.

Постановка проблеми. Сталь Ст6 достаточно широко используется для изготовления арматурных стержней, упрочняемых с непосредственного электронагрева. В то же время в ней не изучалось поведение аустенитного зерна при этом виде нагрева.

Анализ последних исследований и публикаций. Размер зерна аустенита предопределяет дисперсность продуктов его превращения (феррита, перлита, бейнита, мартенсита), поэтому измельчение аустенитного зерна при термообработке металлоизделий является актуальной задачей. Чем мельче аустенитное зерно при термообработке изделий, тем выше механические и служебные свойства.

В работе [1] исследовали влияние поверхностного упрочнения инструментальной стали обработкой электрическим разрядом на механические свойства стали. При указанной термообработке за счёт получения мелкозернистой структуры резко повысилась твёрдость, прочность, коррозионная стойкость, что, естественно, улучшило служебные свойства.

Авторами работ [2, 3] были проведены исследования влияния скорости нагрева на положение критических точек железа и некоторых двойных сплавов на его основе, а также стали эвтектоидного состава. Однако не была изучена роль избыточной фазы в сталях доэвтектоидного состава, не изучено поведение аустенитного зерна в условиях быстрого нагрева сталей с метастабильной исходной структурой. В работе [4] нашли, что ускоренный нагрев ТВЧ рельсовой стали обеспечивает получение гораздо более мелкого аустенитного зерна, чем печной нагрев.

Цель статьи. Исследование влияния скорости непосредственного электронагрева, температуры нагрева и времени выдержки на размер зерна аустенита стали Ст6.

Изложение основного материала. Исследования проводили на цилиндрических образцах стали Ст6 размерами: диаметр 10мм, длина 50мм. Химический состав стали приведен в таблице.

Таблица

Химический состав в % стали Ст6

C	Si	Mn	S	P
0,49	0,30	0,71	0,032	0,036

Эксперименты проведены на установке комплексного исследования сплавов при больших скоростях изменения температуры в условиях нагрева и охлаждения, которая позволяла регистрировать температуру, удлинение, уширение образца, силу нагревающего тока и падение напряжения на образце. Диапазон скоростей изменения температуры при нагреве составлял от 0,1°C/с до 30°C/с.

Проводили термические и дилатометрические измерения в условиях электроконтактного

нагрева образцов. Электроды и термопары приваривались к образцу, что позволяло получить экспериментальные данные с малой погрешностью.

Температуру завершения растворения феррита в аустените (A_{c3}) определяли по термическим и дилатометрическим кривым нагрева и уточняли металлографическим методом на оптическом и электронном микроскопах. Зерно аустенита, полученное при различных условиях нагрева, фиксировали резкой закалкой образцов потоком холодной воды. Выявили его в стандартном пикриновом травителе. Средний размер зерна определяли на металлографическом микроскопе «Неофот» методом секущих.

На рис. 1 показана зависимость точки A_{c3} от скорости нагрева, где приведены две кривые. Кривая 1, построенная по температурным перегибам на дилатометрических и термических кривых оказывается не истинной точкой A_{c3} , т. к. в закалённых от этой температуры образцах наблюдалось ещё $\approx 1,5\%$ нерастворённого феррита. Более точное расположение точки A_{c3} получено микроанализом закалённых образцов – кривая 2 на рис. 1. Из расположения кривых видно, что при увеличении скорости нагрева примерно до $10^\circ\text{C}/\text{c}$ точка A_{c3} повышается примерно на 40°C , а дальнейшее увеличение скорости нагрева до $30^\circ\text{C}/\text{c}$ практически не влияет на точку A_{c3} .

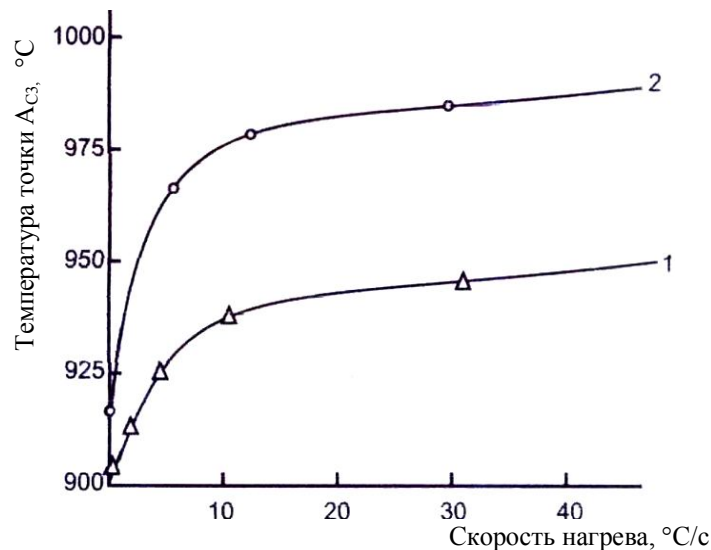


Рис. 1 – Влияние скорости нагрева стали Ст6 на температуру точки A_{c3} : 1 – 1,5% феррита; 2 – 0% феррита

Также из рис 1 видно, что различие в расположении кривых 1 и 2 при малых скоростях нагрева (от $0,1$ до $0,5^\circ\text{C}/\text{c}$) составляет 15°C , а при 10-кратном увеличении скорости нагрева ($5^\circ\text{C}/\text{c}$) она увеличивается до $40^\circ\text{C}/\text{c}$. Следовательно, при термообработке изделий с быстрым нагревом необходимо учитывать этот факт, поскольку чаще всего требуется полная аустенизация изделий.

При термообработке изделий практически всегда важно обеспечить получение мелкого аустенитного зерна, поэтому в настоящей работе изучали особенности формирования зерна при изменении условий аустенизации. На рис. 2 показано, как влияет скорость нагрева на величину начального зерна, т. е. зерна, формирующегося при нагреве до температуры, немного превышающей точку A_{c3} (на $5\text{--}10^\circ\text{C}/\text{c}$). Видно, что при повышении скорости нагрева начальное зерно аустенита значительно измельчается. Но этот процесс достаточно быстро затухает. Так, при увеличении скорости нагрева от $0,1$ до $0,5^\circ\text{C}/\text{c}$, размер зерна уменьшается на 7 мкм (от 22 до 15 мкм), а увеличение скорости нагрева до $5\text{--}10^\circ\text{C}/\text{c}$, дополнительно измельчает зерно только на $3\text{--}5\text{ мкм}$. Дальнейшее увеличение скорости нагрева от 10 до $30^\circ\text{C}/\text{c}$ не вызывает существенного изменения размера начального зерна.

Таким образом, эффективное измельчение аустенитного зерна происходит при увеличении скорости нагрева в сравнительно узком диапазоне. Это значит, что при термообработке изделий не следует стремиться к получению особенно высоких скоростей нагрева, так как это

приводит к неоправданному увеличению мощности нагревательного оборудования и, следовательно, к увеличению капитальных затрат.

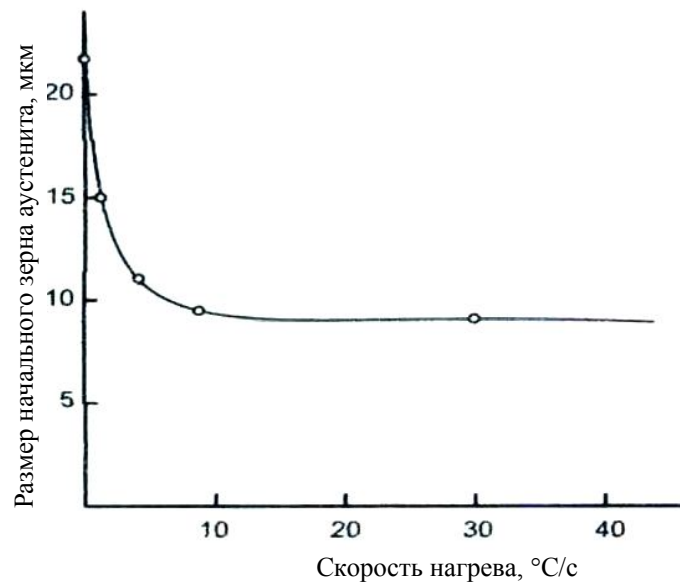


Рис. 2 – Влияние скорости нагрева на размер начального зерна в стали Ст6

Знание того, как влияет скорость нагрева на начальное зерно, недостаточно, так как при термообработке с электронагревом (ТВЧ и др.) обычно нагрев проводят со значительным перегревом выше точки A_{c3} . В связи с этим проводили изучение роста зерна аустенита стали Ст6 при повышении температуры нагрева до 1000°C . Полученные данные роста зерна при различных скоростях нагрева приведены на рис. 3.

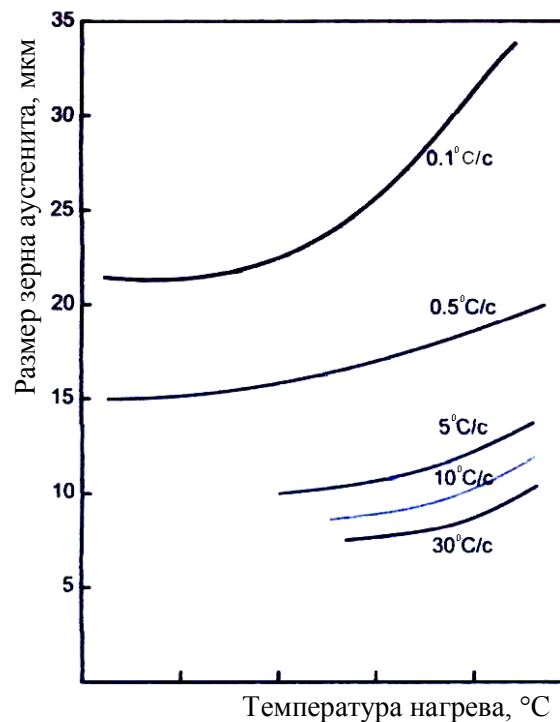


Рис. 3 – Рост зерна аустенита в стали Ст6 в условиях непрерывного нагрева при различных скоростях нагрева

Из рис. 3 видно, что зерно аустенита растёт при всех изученных скоростях нагрева, но с

разной интенсивностью. Наиболее значительное укрупнение зерна наблюдается при малой скорости нагрева ($0,1^{\circ}\text{C}/\text{c}$). Его поперечник увеличивается на 15 мкм. Однако, увеличение скорости нагрева всего до $0,5^{\circ}\text{C}/\text{c}$ уменьшает прирост зерна до 3 мкм, а при дальнейшем увеличении скорости нагрева до $5-10^{\circ}\text{C}/\text{c}$ этот прирост уменьшается до 2 мкм.

Иногда при электронагреве изделий (например, рельсов) с целью получения более однородного аустенита [4] проводят, практически, изотермическую выдержку, поэтому представляет практический интерес изучение изотермического роста аустенитного зерна в стали Ст6, в отношении которой в литературе этот вопрос не освещён.

Из рис. 4 видно, что после нагрева со скоростью $5^{\circ}\text{C}/\text{c}$ до 900°C изотермическая выдержка в течение до 20 мин приводит к незначительному росту аустенитного зерна. Незначительно вырастает зерно и при повышении температуры выдержки до 950°C , но выдержка при 1000°C очень сильно (в 3 раза) укрупняет зерно.

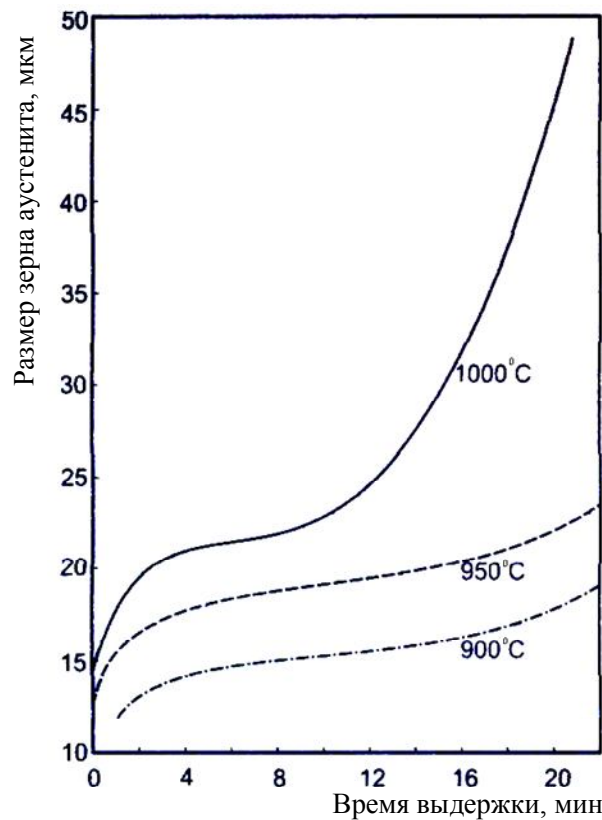


Рис. 4 – Изотермический рост зерна аустенита стали Ст6 при нагреве до температуры выдержки со скоростью $5^{\circ}\text{C}/\text{c}$

Таким образом, при быстром нагреве с целью сохранения аустенитного зерна мелким нежелательно производить изотермическую выдержку изделия после быстрого (ускоренного) нагрева. Только при температуре, соответствующей примерно точке A_{c3} , такая выдержка допустима, практически, без ухудшения зерновой характеристики стали.

Выводы

1. Критическая точка A_{c3} стали Ст6 повышается примерно на 50°C при увеличении скорости нагрева от $0,1$ до $10^{\circ}\text{C}/\text{c}$. Дальнейшее увеличение скорости нагрева до $30^{\circ}\text{C}/\text{c}$ не приводит к существенному повышению этой точки.
2. Начальное зерно аустенита стали Ст6 тем мельче, чем выше скорость нагрева образцов в интервале $0,1-10^{\circ}\text{C}/\text{c}$. Наиболее сильное измельчение зерна происходит при увеличении скорости нагрева в интервале $0,1-5,0^{\circ}\text{C}/\text{c}$.

3. При повышении температуры нагрева стали Ст6 выше точки A_{c3} до 1000°C происходит рост зерна аустенита. Наиболее сильно этот рост наблюдается при малой скорости нагрева ($0,1^{\circ}\text{C}/\text{с}$).
4. Изотермическая выдержка образцов стали Ст6 при 900 и 950°C незначительно укрупняет аустенитное зерно, а выдержка при 1000°C приводит к сильному его росту.

Список использованных источников:

1. Kraster Dimitar About the surface hardening of tool steels by electrical discharge treatment in electrolyte / Dimitar Kraster, Vordanov Bayan // Solid State Phenom. – 2010. – №159. – P. 137-140.
2. Гриднев В.Н. Критические точки сплавов железа при быстром нагреве / В.Н. Гриднев, С.П. Ошкадеров // Фазовые превращения : сб. статей. – К., 1970. – №27. – С. 84-87.
3. Гриднев В.Н. Критические точки чистого железа при скоростном электронагреве / В.Н. Гриднев, Ю.Я. Мешков, С.П. Ошкадеров // Вопросы физики металлов и металловедения. – К., 1964. – №18. – С. 96-99.
4. Разработка оптимальных режимов поверхностной закалки с нагревом ТВЧ / Д.В. Сталинский [и др.] // Metallurgical and Mining Industry. – 2009. – №5. – С. 65-70.

Bibliography:

1. Kraster Dimitar About the surface hardening of tool steels by electrical discharge treatment in electrolyte / Dimitar Kraster, Vordanov Bayan // Solid State Phenom. – 2010. – №159. – P. 137-140.
2. Gridnev V.N. Critical points alloys of iron during rapid heating / V.N. Gridnev, S.P. Oshkaderov // Phase Transformations: Sat articles. – K., 1970. – №27. – P. 84-87. (Rus.)
3. Gridnev V.N. Critical point of pure iron at high-speed electrically / V.N. Gridnev, Y.Y. Meshkov, S.P. Oshkaderov // Problems of Physics of Metals and Metal. – K., 1964. – №18. – P. 96-99. (Rus.)
4. Development of optimal regimes for surface Kalki with HFC heating / D.V. Stalinsky [etc.] // Metallurgical and Mining Industry. – 2009. – №5. – P. 65-70. (Rus.)

Рецензент: А.М. Скребцов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 26.02.2015