

УДК 669.1.017:669.112.227.3:669.141.24
DOI:10.30838/J.PMNTM.2413.240418.34.103

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА НА КИНЕТИКУ РАСПАДА АУСТЕНИТА ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ С82D^V

ПАРУСОВ Э. В.¹, к. т. н., с. н. с.,
КЛИМЕНКО А. П.², к. т. н., с. н. с.,
ЛУЦЕНКО В. А.³, д. т. н., с. н. с.,
ЧУЙКО И. Н.⁴, к. т. н.,
САГУРА Л. В.^{5*}, к. т. н.,
СИВАК А. И.⁶

¹ Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, 49000, Украина, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

² Украинский государственный химико-технологический университет, пр. Гагарина 8, Днепро, 49005, Украина, тел. +38(056) 778-26-41, e-mail: klimenko_a_p@ukr.net

³ Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, 49000, Украина, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: lutsenko-va@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-4604-5592

⁴ Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, 49000, Украина, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: ferroslay@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

^{5*} Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, 49000, Украина, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: slv_metal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2614-0322

⁶ Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова НАН Украины, пл. Академика Стародубова, 1, Днепро, 49000, Украина, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: allasivak@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-6948-7732

Аннотация. Постановка проблемы. Современные тенденции строительной индустрии определяют эту отрасль как одного из основных потребителей высокопрочной холоднодеформированной металлопродукции. Высокие требования, предъявляемые к классам прочности такой арматуры (1 670, 1 770, 1 860 и 2 000 МПа), обуславливают необходимость использования при её производстве бунтового проката с содержанием углерода 0,8...0,9 % диаметром 8,0...14,0 мм со значением временного сопротивления разрыву не менее 1 150 МПа и высоким уровнем пластических показателей ($\delta_{10} \geq 10 \%$, $\psi \geq 30 \%$). На практике, при охлаждении проката с повышением его диаметра проявляется влияние масштабного фактора – фактическая скорость охлаждения снижается, а для достижения требуемого структурного состояния стали необходим поиск резервных возможностей повышения устойчивости переохлажденного аустенита и адаптации скоростей охлаждения к условиям работы действующего оборудования. **Цель работы.** Исследование влияния температуры нагрева на устойчивость аустенита и изменение кинетики распада высокоуглеродистой ванадийсодержащей стали при непрерывном охлаждении с различными скоростями. **Результаты.** Изучены особенности кинетики распада аустенита и закономерности формирования структуры ванадийсодержащей стали С82D^V, нагретой до температуры 1 040 °С и подвергнутой непрерывному охлаждению с различными скоростями. Нагрев стали С82D^V до температуры 1 040 °С позволяет несколько снизить температуру начала диффузионного распада аустенита (A_{r1}), в результате чего степень дисперсности перлита повышается, а фактическая скорость охлаждения возрастает при прочих равных условиях. Обоснованы наиболее рациональные интервалы скоростей воздушного охлаждения стали С82D^V, которые позволяют обеспечить формирование в структуре стали не менее 90 % сорбитообразного перлита, исключить появление цементита вторичного, а также структур, образующихся по промежуточному и сдвиговому механизмам.

Ключевые слова: кинетика превращений аустенита; структура; бунтовой прокат; высокоуглеродистая сталь; скорость охлаждения

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ НАГРІВУ НА КІНЕТИКУ РОЗПАДУ АУСТЕНІТУ ВИСОКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ С82D^V

ПАРУСОВ Е. В.¹, к. т. н., с. н. с.,
КЛИМЕНКО О. П.², к. т. н., с. н. с.,
ЛУЦЕНКО В. А.³, д. т. н., с. н. с.,
ЧУЙКО І. М.⁴, к. т. н.,
САГУРА Л. В.^{5*}, к. т. н.,
СИВАК Г. І.⁶

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49000, Україна, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

² Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна 8, Дніпро, 49005, Україна, тел. +38(056) 778-26-41, e-mail: klimenko_a_p@ukr.net

³ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49000, Україна, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: lutsenko-va@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-4604-5592

⁴ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49000, Україна, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: ferrosplav@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

^{5*} Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49000, Україна, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: slv_metal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2614-0322

⁶ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, Дніпро, 49000, Україна, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: allasivak@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-6948-7732

Анотація. Постановка проблеми. Сучасні тенденції будівельної індустрії визначають цю галузь як одного з основних споживачів високоміцної холоднодеформованої металопродукції. Високі вимоги, що пред'являються до класів міцності такої арматури (1 670, 1 770, 1 860 та 2 000 МПа), зумовлюють необхідність використання для її виробництва бунтового прокату з вмістом вуглецю 0,8...0,9 % діаметром 8,0...14,0 мм зі значенням тимчасового опору розриву не менше 1 150 МПа і високим рівнем пластичних показників ($\delta_{10} \geq 10 \%$, $\psi \geq 30 \%$). На практиці, під час охолодження прокату з підвищенням його діаметра проявляється вплив масштабного чинника – фактична швидкість охолодження знижується, а для досягнення необхідного структурного стану сталі необхідний пошук резервних можливостей підвищення стійкості переохолодженого аустеніту і адаптації швидкостей охолодження до умов роботи діючого обладнання. **Мета роботи** – дослідження впливу температури нагріву на стійкість аустеніту і зміни кінетики розпаду високовуглецевої ванадійвмісної сталі за безперервного охолодження з різними швидкостями. **Результати.** Вивчено особливості кінетики розпаду аустеніту і закономірності формування структури ванадійвмісної сталі C82D^V, нагрітої до температури 1 040 °C і підданій безперервному охолодженню з різними швидкостями. Нагрівання сталі C82D^V до температури 1 040 °C дозволяє дещо знизити температуру початку дифузійного розпаду аустеніту (A_{r1}), в результаті чого ступінь дисперсності перліту підвищується, а фактична швидкість охолодження зростає за інших рівних умов. Обґрунтовано найбільш раціональні інтервали швидкостей повітряного охолодження сталі C82D^V, які дозволяють забезпечити формування у структурі сталі не менше 90 % сорбітоподібного перліту, виключити появу цементиту вторинного, а також структур, що утворюються за проміжним і зсувним механізмами.

Ключові слова: кінетика перетворень аустеніту; структура; бунтовий прокат; високовуглецева сталь; швидкість охолодження

THE INFLUENCE OF THE HEATING TEMPERATURE ON THE KINETICS OF THE AUSTENITE DISSOLUTION OF HIGH-CARBON STEEL C82D^V

PARUSOV E.V.¹, *Ph. D., Sen. Res.*,
 KLIMENKO A.P.², *Ph. D., Sen. Res.*,
 LUTSENKO V.A.³, *Dr. Sc.(Tech.), Sen. Res.*,
 CHUIKO I.N.⁴, *Ph. D.*,
 SAHURA L.V.^{5*}, *Ph. D.*,
 SIVAK G.I.⁶

¹ Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubov's Sq., 1, Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

² Ukrainian State University of Chemical Technology, Gagarin Ave., 8, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38(056) 778-26-41, e-mail: klimenko_a_p@ukr.net

³ Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubov's Sq., 1, Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: lutsenko-va@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-4604-5592

⁴ Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubov's Sq., 1, Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: ferrosplav@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4753-614X

^{5*} Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubov's Sq., 1, Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: slv_metal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2614-0322

⁶ Iron and Steel Institute named after Z. I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ak. Starodubov's Sq., 1, Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: allasivak@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-6948-7732

Abstract. Formulation of the problem. Modern trends in the construction industry make this industry one of the main consumers of high-strength cold-deformed steel products. The high requirements imposed on the strength classes of such reinforcement (1 670, 1 770, 1 860 and 2 000 MPa) necessitate the use of rutille rolled products with a carbon content of 0,8...0,9 % in diameter 8,0...14,0 mm with the value of the temporary rupture resistance is not less than 1 150 MPa and a high level of plastic indicators ($\delta_{10} \geq 10 \%$, $\psi \geq 30 \%$). In practice, when cooling is rolled with an increase in its diameter, the effect of the scale factor is

manifested – the actual cooling rate is reduced, and in order to achieve the required structural state of steel, it is necessary to search for reserve possibilities for increasing the stability of the supercooled austenite and adapting the cooling rates to the operating conditions of the operating **Purpose.** Investigation of the influence of the heating temperature on the stability of austenite and the change the kinetics of decomposition of high-carbon vanadium-containing steel under continuous cooling with different rates. **Results.** The features of the kinetics of the decomposition of austenite and the regularities in the formation of the structure of vanadium-containing steel C82D^V heated to a temperature of 1 040 °C and subjected to continuous cooling at various rates have been studied. Heating of C82D^V steel to a temperature of 1 040 °C allows us to somewhat lower the temperature of the onset of the diffusion decomposition of austenite (A_{r1}), as a result of which the degree of dispersion of perlite increases, and the actual cooling rate increases with all other conditions being equal. The most rational intervals of air cooling rates for C82D^V steel are established, which allow to ensure formation of at least 90 % of sorbitol-like perlite in the structure of steel, exclude the appearance of secondary cementite, and also structures formed by intermediate and shear mechanisms.

Keywords: kinetics of austenite transformation; structure; wire rod; high-carbon steel; cooling rate

Введение

Современные тенденции строительной индустрии делают эту отрасль одним из основных потребителей высокопрочной холоднодеформированной металлопродукции. Значительную долю в строительстве занимает высокопрочная металлоарматура, которая используется в ответственных конструкциях, где необходимо решить проблему напряженных пролетов и обеспечить устойчивость к значительным нагрузкам (вантовые мосты, водопропускные конструкции, объекты скоростных автомобильных и железнодорожных магистралей). Высокие требования, предъявляемые к классам прочности такой арматуры (1 670, 1 770, 1 860 и 2 000 МПа), обуславливают необходимость использования при её производстве бунтового проката с содержанием углерода 0,8...0,9 % диаметром 8,0...14,0 мм со значением временного сопротивления разрыву не менее 1 150 МПа и высоким уровнем пластических показателей ($\delta_{10} \geq 7\%$, $\psi \geq 20\%$). В европейской практике обеспечение таких требований при производстве проката достигается за счет целенаправленного ввода в сталь легирующих элементов (ванадий и/или хром, алюминий).

Режимы деформационно-термической обработки (ДТО) бунтового проката из высокоуглеродистой стали диаметром 8,0...14,0 мм, используемые сегодня на национальных металлургических предприятиях, являются неэффективными и требуют доработки, ввиду того, что производство холодно деформированной проволочной заготовки способом прямого волочения (без патентирования) фактически не представляется возможным. Такая особенность обусловлена рядом причин: недостаточной мощностью воздушных вентиляторных систем на транспортере линии Стелмор, морально устаревшей нормативной документацией, а также отсутствием технологических решений, позволяющих улучшить качественные показатели металла при охлаждении с прокатного нагрева.

Для высокоуглеродистых сталей одним из главных показателей, который регламентируется нормативной документацией, является количество сорбитообразного перлита в структуре проката. Известно, что межпластиночное расстояние в перлите имеет непосредственную связь с величиной

аустенитного зерна, которое, в свою очередь, зависит от температуры нагрева (аустенитизации) стали. Повышение температуры позволяет провести более полную гомогенизацию химического состава стали, способствует рассасыванию концентрационных флуктуаций, выступающих зародышами при распаде аустенита [1; 2]. С ростом температуры аустенитизации проявляется действие теплотехнического фактора, вследствие которого фактическая скорость охлаждения стали повышается [3].

Теоретические основы ДТО бунтового проката базируются на закономерностях фазовых и структурных превращений, происходящих в стали, которая подвергается горячей пластической деформации и последующему непрерывному охлаждению [4; 5]. При разработке режимов ДТО учитывается ряд особенностей: температура нагрева металла, деформационный разогрев в клетях прокатного стана, дробность и скорость деформации, температура окончания горячей деформации, длительность последеформационной паузы, площадь поперечного сечения проката [6–8].

При термической обработке бунтового проката необходимо учитывать фактическую скорость охлаждения металла в области диффузионного превращения, повышение которой может быть достигнуто за счет роста величины аустенитного зерна при более высоких температурах окончания горячей деформации. Эффективным параметром, который позволяет улучшить комплекс механических свойств сталей перлитного класса, является скорость воздушного охлаждения проката. Повышение скорости воздушного охлаждения приводит к снижению критической точки A_{r1} и, соответственно, уменьшению межпластиночного расстояния в перлите. Однако на практике не всегда удается добиться требуемой скорости охлаждения бунтового проката в потоке непрерывных мелкосортно-проволочных станов.

Ввиду изложенного, представляло интерес провести сравнительный анализ влияния температуры аустенитизации ванадийсодержащих сталей близкого химического состава на изменение кинетики распада аустенита при непрерывном охлаждении с различными скоростями.