

УДК 621.771.01.004.942

О МЕХАНИЗМЕ УСКОРЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ТЕРМОУПРОЧНЕНИИ ПРОКАТА*

Сарычев В.Д., к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин
им. проф. В.М. Финкеля (sarychev_vd@mail.ru)

Невский С.А., к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин
им. проф. В.М. Финкеля (nevskiy.sergei@yandex.ru)

Ильященко А.В., студент (alexshool@mail.ru)

Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Предложен механизм, объясняющий высокое значение коэффициента теплопередачи при ускоренном охлаждении проката. При скоростях больше критической возникает неустойчивость Кельвина–Гельмгольца в нанодиапазоне, что приводит к формированию нанокапель. Охлаждение ведется с помощью нанокапель, движущихся через такую паровую пленку. Это позволяет при моделировании структурно-фазовых превращений использовать коэффициент теплопередачи, рассчитанный по формуле, в которой учитывается теплопроводность воды. Вторая роль нанокапель состоит в генерации теплового удара, за счет которого формируются мощные термоупругие волны. Роль упругих волн заключается в повышении ударной вязкости, так как возникшие на первой стадии охлаждения трещины в последующих секциях при взаимодействии упругой волны со свободными берегами трещин захлопываются.

Ключевые слова: ускоренное охлаждение проката, коэффициент теплопередачи, неустойчивость Кельвина–Гельмгольца, нанокапли, тепловой удар.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-12-1005-1007

В потоке непрерывных станов одним из наиболее прогрессивных технологических процессов, обеспечивающих существенное повышение механических и эксплуатационных свойств арматуры, является термоупрочнение проката [1 – 5]. Для разработки оптимальных режимов термоупрочнения и целенаправленного управления эксплуатационными свойствами необходимо установление связи между распределением температур по сечению проката и образующимися структурно-фазовыми состояниями. Для этого требуется решение задачи теплопроводности с граничными условиями, отражающими характер теплоотвода при определенной технологической схеме. Такой подход был использован при моделировании охлаждения арматуры и определения структурно-фазовых состояний [1] и недавно реализован для проката сложного профиля [6].

Характер теплоотвода определяется коэффициентом теплопередачи, то есть усредненным тепловым потоком на каждом участке в определенный промежуток времени; его численное значение выбирается из некоторого диапазона значений, границы которого определены из условия, что на горячий прокат падают капли воды. Окончательное значение коэффициента теплопередачи выбирается таким образом, чтобы расчетное

значение температуры конца охлаждения совпадало с измеренной температурой на холодильнике. Численные значения коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{дв}}$ в секциях охлаждения (движущаяся вода) находятся в пределах 38 – 115 кВт/(м²·К). Согласно справочным данным коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{нв}}$ кипящая вода (неподвижная вода) – металлическая стенка находится в пределах 3,5 – 5,8 кВт/(м²·К) [7]. Такое различие значений $\alpha_{\text{дв}}$ и $\alpha_{\text{нв}}$ можно объяснить тем, что в неподвижной системе кипящая вода – горячий металл образует паровую пленку, которая резко снижает теплопередачу. Но при термоупрочнении проката процесс становится устойчивым, если принять, что паровая пленка пробивается каплями жидкости.

Действительно, в результате экспериментов [8] с подачей воды на горячее изделие с разными скоростями было установлено, что, начиная со скорости не менее 12 м/с, образования паровой пленки не происходит. В условиях прокатного стана это соответствует подаче воды в охлаждающее устройство под давлением не менее 20 атм., что в несколько раз больше, чем использовалось ранее. Кроме того, выявлен важный параметр – относительная скорость воды по отношению к прокату, которая определяет скорость охлаждения, прямолинейность и гидротранспортирование проката.

В настоящей работе предлагается новый механизм охлаждения. При стационарном перепаде температур

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-48-420530.

1000 °С эта пленка появляется, но через эту пленку движутся капли, которые формируются за счет развития неустойчивости на границе пар – вода. На границе раздела развивается неустойчивость Кельвина–Гельмгольца в нано- и микроразмерном диапазоне длин волн [9]. Считается, что длина волны максимальной неустойчивости определяет размер капель. Значит, образуются капли наноразмера; с их помощью пробивается паровой слой и поэтому происходит капельное охлаждение.

Время воздействия капли на жесткую поверхность можно оценить по значению $d/c \sim 10^{-11}$ с (где d – диаметр капли; c – скорость звука). При таком значении времени воздействия капли происходит термоудар, генерирующий упругую волну [10]. Роль упругих волн заключается в повышении ударной вязкости, так как возникшие на первой стадии охлаждения трещины в последующих секциях при взаимодействии упругой волны со свободными берегами трещин захлопываются. Результаты исследований, приведенные в монографии [11], свидетельствуют об успешном применении различного рода воздействий с целью торможения и остановки разрушения. В работе [12] установлена возможность закрытия трещин при импульсных нагрузках, соответствующих области линейно-упругих деформаций материала.

Выводы. При скоростях больше критической возникает неустойчивость Кельвина–Гельмгольца в нанодиапазоне, что приводит к формированию нанокапель. Охлаждение происходит с помощью нанокапель, движущихся через такую паровую пленку, что позволяет при моделировании структурно-фазовых превращений использовать коэффициент теплопередачи, рассчитанный по формуле, в которой учитывается теплопроводность воды. Вторая роль нанокапель состоит в генерации теплового удара, за счет которого формируются мощные термоупругие волны. Роль упругих волн заключается в повышении ударной вязкости, так как возникшие на первой стадии охлаждения трещины в последующих

секциях при взаимодействии упругой волны со свободными берегами трещин захлопываются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юрьев А.Б. Упрочнение строительной арматуры и прокатных валков. – Новосибирск: Наука, 2006. – 227 с.
2. Liska S., Wozniak J. Model vyvoje struktury a mechanich vlastnosti oceli pri valcovani za tepla // Kovove materialy (Bratislava) 1982. Vol. 20. No. 5. S. 562 – 572.
3. Рудской А.И., Колбасников Н.Г. Управление структурой и свойствами сталей при горячей деформации // Заготовительное производство в машиностроении. 2012. № 10. С. 22 – 30.
4. Платов С.И., Ярославцев А.В., Тумбасов К.С., Ярославцева К.К. Повышение качества горячекатаного сортового арматурного проката из низко- и среднеуглеродистых марок стали за счет выбора оптимальных термомеханических режимов обработки // Производство проката. 2016. № 10. С. 21 – 25.
5. Ноговицын А.В., Богачева А.В., Евсюков Н.Ф., Лошкарев Д.В. Прогнозирование процессов структурообразования при охлаждении металлопроката с применением математической модели // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1999. № 5. С. 75 – 78.
6. Сарычев В.Д., Громов В.Е., Грановский А.Ю., Шляпников С.С., Ильященко А.В. Математическая модель расчета температурных полей при прерывистом охлаждении проката // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2016. № 3. С. 339 – 342.
7. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1985. – 520 с.
8. Большаков В.И. История развития термического упрочнения проката. – Днепропетровск: ИПГАСА, 2012. – 388 с.
9. Sarychev V.D., Nevskii S.A., Sarycheva E.V., Kononov S.V., Gromov V.E. Viscous flow analysis of the Kelvin–Helmholtz instability for short waves // AIP Conference Proceedings. 2016. Vol. 1783. P. 020198.
10. Сарычев В.Д., Волошина М.С., Громов В.Е. Математическая модель генерации термоупругих волн при воздействии концентрированных потоков энергии на материалы // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2011. Т. 8. №. 4. С. 71 – 76.
11. Финкель В.М. Физические основы торможения разрушения. – М.: Металлургия, 1977. – 360 с.
12. Фомин И.М. Залечивание трещин волнами напряжений в щелочно-галлоидных кристаллах: Авторефер. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Ростов-на-Дону, 1984. – 20 с.

Поступила 4 октября 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 12, pp. 1005–1007.

ON ACCELERATED COOLING MECHANISMS IN THERMAL HARDENING OF ROLLED METAL

V.D. Sarychev, S.A. Nevskii, A.V. Il'yashchenko

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. A mechanism is proposed that explains high value of heat transfer coefficient for accelerated cooling of rolled products. At velocities greater than the critical value, the Kelvin–Helmholtz instability arises in nanoscale, which leads to formation of nanodroplets. Cooling is carried out with the help of nanotubes moving through such a vapor film. This allows using the coefficient of heat transfer calculated by the formula in which thermal conductivity of water is taken into account when modeling structural-phase transformations. The second role of nanodrops is to generate a thermal shock, due to which powerful thermoelastic waves are formed.

The role of elastic waves is to increase the toughness, since the cracks that appear in the first cooling stage in subsequent sections when the elastic wave interacts with the free shores of the cracks, collapse.

Keywords: accelerated cooling of rolled products, heat transfer coefficient, Kelvin–Helmholtz instability, nanodrops, thermal shock.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-12-1005-1007

REFERENCES

1. Yur'ev A.B. *Uprochnenie stroitel'noi armatury i prokatnykh valkov* [Strengthening of building fittings and rolling rolls]. Novosibirsk: Nauka, 2006, 227 p. (In Russ.).