

УДК 669.146

***М. В. Майсурадзе*, О. А. Сурнаева, А. В. Ли, И. А. Махмутова,
А. И. Бикбалтина, К. А. Винокурова***

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

**spirallog@gmail.com*

ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРНОЙ ПОЛОСЧАТОСТИ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В КОНСТРУКЦИОННЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ

Выполнено количественное определение степени структурной полосчатости в конструкционных легированных сталях 40ХН2МА, 38ХГМА, 20ХНЗА. Показано, что существует явная зависимость между структурной полосчатостью, характеризуемой индексом анизотропии, и механическими свойствами стали: разбросом значений микротвердости и анизотропией ударной вязкости.

Ключевые слова: легированная сталь; структурная полосчатость; индекс анизотропии; микротвердость; ударная вязкость.

***M. V. Maysuradze, O. A. Surnaeva, A. V. Li, I. A. Makhmutova,
A. I. Bikbaltina, K. A. Vinokurova***

CORRELATION BETWEEN MICROSTRUCTURE BANDING AND MECHANICAL PROPERTIES OF ALLOYED STEELS

The microstructure banding in alloyed steels 4340, 42CrMo4 and 20NC11 was estimated using standard approach (ASTM E 1268). The correlation between the anisotropy index and the mechanical properties of the studied steels (the scatter of the microhardness values, reduction of the impact strength in transverse direction) was derived.

Keywords: alloyed steel; microstructure banding; anisotropy index; microhardness; impact strength.

Структурная полосчатость является характерной особенностью горячекатаной углеродистой и легированной стали. Причиной ее появления является химическая ликвация легирующих и примесных элементов при кристаллизации слитка или непрерывно литой заготовки [1–3]. Деформация (горячая прокатка, ковка) и термическая обработка приводят к формированию чередующихся полос, содержащих различные фазы и структурные составляющие – полосы феррита в перлитной матрице, полосы мартенсита в ферритной или бейнитной матрице и др. [4–6]. Количественная оценка структурной полосчатости может стать

© Майсурадзе М. В., Сурнаева О. А., Ли А. В., Махмутова И. А., Бикбалтина А. И., Винокурова К. А., 2016

ключевым фактором, позволяющим усовершенствовать существующие или разработать новые алгоритмы производства стального проката с пониженным уровнем структурной неоднородности [7; 8].

Материалом исследования являлись промышленные конструкционные легированные стали 40ХН2МА, 38ХГМА, 20ХН3А. Стали поставлялись в виде круглого горячекатаного проката диаметром 110–190 мм после отжига в условиях завода-изготовителя.

Количественная оценка структурной полосчатости производилась по методике стандарта ГОСТ Р 54570. Анализировалось 15 полей зрения на продольных шлифах. На каждое поле зрения накладывалась тестовая сетка, состоящая из горизонтальных и вертикальных линий. После этого производился подсчет количества пересечений светлых полос микроструктуры с горизонтальными ($N_{\text{перп}}$) и вертикальными ($N_{\text{парал}}$) линиями сетки. На основании полученных данных был рассчитан индекс анизотропии AI как отношение $N_{\text{перп}}/N_{\text{парал}}$.

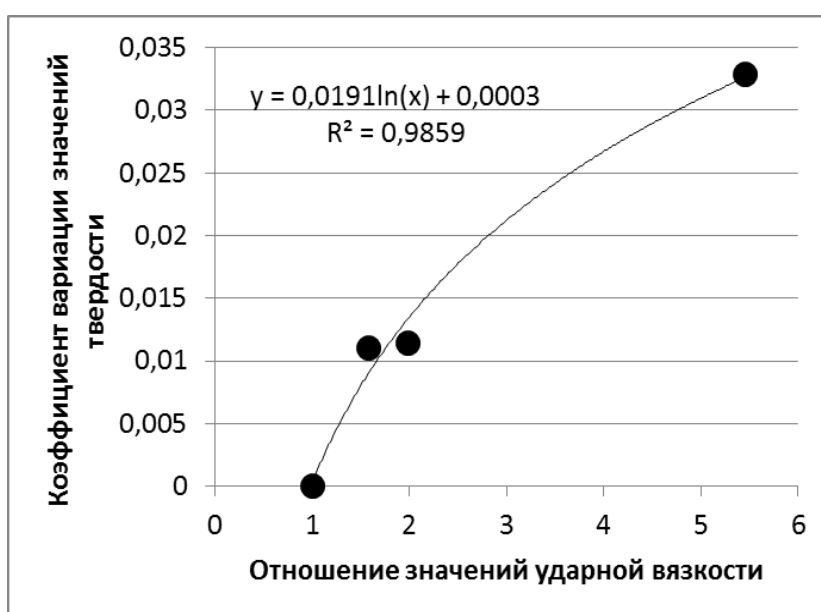
Для исследования ударной вязкости конструкционных сталей были отобраны образцы вдоль и поперек направления прокатки таким образом, чтобы концентратор напряжений находился в одной зоне поперечного сечения проката (середина радиуса) как на продольных, так и на поперечных образцах. Образцы подвергались термической обработке по следующему режиму: закалка в масле И20А от температуры 850 °С (время выдержки – 60 мин), отпуск при температуре 525 °С (для сталей 40ХН2МА и 38ХГМА) и 200 °С (для стали 20ХН3А) в течение 3 ч. Испытания на ударный изгиб были проведены в соответствии с ГОСТ 9454 на маятниковом копре при комнатной температуре с использованием образцов с V-образным концентратором (тип 11).

Установлено, что ударная вязкость, определенная на поперечных образцах, ниже, чем на продольных, для всех исследуемых марок стали. Для продольных образцов уровень ударной вязкости всех исследуемых сталей достаточно высок и составляет 0,80–1,00 МДж/м². Для поперечных образцов минимальным уровнем ударной вязкости обладает сталь 38ХГМА (0,17 МДж/м²), а стали 40ХН2МА и 20ХН3А обладают ударной вязкостью порядка 0,50 МДж/м². Таким образом, для сталей 40ХН2МА и 20ХН3А отношение ударной вязкости для продольных и поперечных образцов составляет 1,6–2,0, а для стали 38ХГМА – 5,5.

Изучение микроструктуры образцов исследуемых сталей показало, что сталь марки 38ХГМА обладает выраженной структурной полосчатостью: полосы контрастные, с резкими границами. Определена разница значений микротвердости в отдельных полосах для исследуемых сталей: для стали 40ХН2МА она составила 30 *HV*, для стали 38ХГМА – 52 *HV*, для стали 20ХН3А – 31 *HV*. Индекс анизотропии, определенный на 15 полях зрения для каждой исследованной марки стали, составил 3,7 для стали 40ХН2МА и 20ХН3А и 4,6 для стали 38ХГМА.

Таким образом, значительное снижение ударной вязкости на поперечных образцах стали 38ХГМА напрямую связано с неоднородностью (полосчатостью) микроструктуры.

Проведенные исследования позволили связать отношение ударной вязкости на продольных и поперечных образцах с разбросом значений твердости, характеризующимся коэффициентом вариации – отношением среднеквадратичного отклонения значений твердости к ее среднему значению (см. рисунок). На приведенном графике точка со значением коэффициента вариации, равным 0, соответствует идеальному случаю абсолютно изотропного металла, для которого значение ударной вязкости не зависит от ориентировки образца относительно направления прокатки.



Зависимость коэффициента вариации значений твердости от отношения величины ударной вязкости на продольных образцах к величине ударной вязкости на поперечных образцах

Также можно установить взаимосвязь между отношением ударной вязкости на продольных и поперечных образцах с индексом анизотропии, являющимся характеристикой структурной полосчатости стали. Установлено, что увеличение индекса анизотропии в 1,2 раза (от 3,7 до 4,6) приводит к увеличению отношения ударной вязкости для продольных и поперечных образцов в три раза.

Таким образом, выявленные зависимости позволяют оценить по косвенным механическим характеристикам степень полосчатости структуры металла, а также наоборот – зная индекс анизотропии для конкретного диаметра проката и плавки, определить анизотропию механических свойств.

Полученные зависимости также намечают дальнейшее направление исследований взаимосвязи структурной полосчатости с анизотропией

механических свойств стали, что весьма актуально для организации сдаточного контроля качества металлопродукции на металлургических заводах, а также для входного контроля металлопроката на машиностроительных и иных предприятиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке постановления № 211 Правительства Российской Федерации, контракт № 02.А03.21.0006, в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ, проект № 11.1465.2014/К, а также в рамках Гранта Президента РФ для молодых ученых – кандидатов наук МК-7929.2016.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eckert J. A., Howell P. R., Thompson S. W. Banding and the nature of large, irregular pearlite nodules in a hot-rolled low-alloy plate steel: a second report // Journal of Material Science. 1993. V. 28. № 16. P. 4412–4420.
2. Verhoeven J. D. A review of microsegregation induced banding phenomena in steels // Journal of Materials Engineering and Performance. 2000. V. 9. № 3. P. 286–291.
3. Krauss G. Solidification, segregation, and banding in carbon and alloy steels // Metallurgical and Materials Transactions B. 2003. V. 34. № 6. P. 781–794.
4. Microstructure and distribution of chemical elements in continuous-cast pipe blank / D. A. Silin, I. N. Veselov, S. Yu. Zhukova [et al.] // Steel in Translation. 2006. V. 36. № 4. P. 86–90.
5. Detailed characterization of complex banding in air-cooled bainitic steels / L. Morales-Rivas, H. Roelofs, S. Hasler [et al.] // Journal of Minerals and Metallurgy B. 2015. V. 51. № 1. P. 25–32.
6. ASTM E 1268-01. Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures. ASTM, 2001. 29 p.
7. Tasan C. C., Hoefnagels J.P.M., Geers M.G.D. Microstructural banding effects clarified through micrographic digital image correlation // Scripta Materialia. 2010. V. 62. P. 835–838.
8. Quantitative analysis of banded structures in dual-phase steels / B. Krebs, A. Hazotte, L. Germain [et al.] // Image Analysis and Stereology. 2010. V. 29. P. 85–90.