

УДК 669.15-194.2:669.019.33

ВЛИЯНИЕ СЛОЖНОЙ ИЕРАРХИИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ХРУПКОЙ ТРЕЩИНЫ В БЕЙНИТНЫХ И МАРТЕНСИТНЫХ СТРУКТУРАХ СТАЛИ

РАЗУМОВА О. В.¹ к. т. н., проф.,
БАРЫБИН Д. А.² асп.,
БОЛЬШАКОВ В. И.³ д.т.н., проф.

¹ кафедра основ архитектуры, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, ORCID ID:0000-0001-8342-2636

² кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID:0000-0003-2530-7968

³ кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

Аннотация. Цель. Анализ распространения транскристаллитного и интеркристаллитного скола в бейнитных структурах и методов получения структуры с достаточно сложной иерархией для остановки хрупкой трещины. **Результаты.** Рассмотренные строительные стали характеризуются сложной иерархией, получение которой возможно при подвергании стали прокатному нагреву после прокатки и при использовании легирования. Это снижает порог хладноломкости, увеличивает сопротивление стали хрупкому разрушению, что обусловлено измельчением структуры и повышением комплекса механических свойств стали. **Выводы.** В данной работе проведен анализ распространения хрупкой трещины в промежуточных структурах. Установлено преимущество сталей со сложной иерархией зерна: игольчатый феррит, малоуглеродистого речного мартенсита, что позволяет подавлять хрупкую трещину при ее распространении в теле структуры.

Ключевые слова: микроструктура; игольчатый феррит; бейнит; высокопрочные низколегированные стали; хрупкая трещина.

ВПЛИВ СКЛАДНОЇ ІЄРАРХІЇ НА ПОШИРЕННЯ КРИХКОЇ ТРІЩИНИ В БЕЙНІТНИХ ТА МАРТЕНСИТНИХ СТРУКТУРАХ СТАЛІ

РАЗУМОВА О. В.¹ к. т. н., проф.,
БАРИБІН Д. О.² асп.,
БОЛЬШАКОВ В. І.³ д.т.н., проф.

¹ кафедра основ архітектури, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, ORCID ID: 0000-0001-8342-2636

² кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-2530-7968

³ кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

Анотація. Цель. Аналіз поширення транскристалітного і інтеркристалітного скола в бейнітних структурах і методів отримання структури з достатньо складною ієрархією для зупинки крихкої тріщини. **Результати.** Розглянуті будівельні сталі характеризуються складною ієрархією, отримання якої можливо при підданні сталі прокатному нагріву після прокатки і при використанні легування. Це знижує поріг холодноломкості, збільшує опір сталі крихкому руйнуванню, що обумовлено подібненням структури і підвищенням комплексу механічних властивостей сталі. **Висновки.** У даній роботі проведено аналіз поширення крихкої тріщини в проміжних структурах. Встановлено перевагу сталей зі складною ієрархією зерна, таких як: голчастий ферит, малоуглецевий рейковий мартенсит, що дозволяє пригнічувати крихку тріщину при її поширенні в тілі структури.

Ключові слова: микроструктура; голчастий ферит; бейніт; високоміцні низьколеговані сталі; крихка тріщина.

INFLUENCE OF COMPLEX HIERARCHY ON THE DISTRIBUTION OF BRITTLE CRACKS IN BAINITIC AND MARTENSITIC STEEL STRUCTURE

RAZUMOVA O. V.¹ *Ph. D., Prof.*,
BARIBIN D. A.² *Grad. st.*,
BOLSHAKOV V. I.³ *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

¹ department of Basics of Architecture, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, ORCID ID: 0000-0001-8342-2636

² department of Materials Science and Treatment of Materials, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, +38 (0562) 47-59-51, e-mail: lab120@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-2530-7968

³ department of Materials Science and Treatment of Materials, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, +38 (0562) 47-59-51, e-mail: , ORCID ID: 0000-0002-2624-4666

Annotation. Goal. Analysis of the propagation of transgranular and intercrystallite cleavage in bainitic structures, and methods for producing structures with a fairly complex hierarchy to stop brittle crack. **Results.** The above construction steel are characterized by a complex hierarchy, the receipt of which is possible by subjecting the steel rolling heating after rolling and using doping. It lowers the threshold of cold brittleness, increases resistance to brittle fracture of steel, which is due to a refinement of the structure and an increase in the mechanical properties of complex steel. **Conclusions.** In this paper we analyzed the propagation of a brittle crack in the intermediate structures. The advantages of steel with a complex hierarchy of grain, such as acicular ferrite, low carbon lath martensite, which allows to suppress brittle fracture during its propagation in the body of structure.

Keywords: microstructure; acicular ferrite; bainite; HSLA steel; cleavage fracture.

Введение

В наше время стали являются отличным строительным материалом для создания любых зданий, сооружений гражданского и промышленного назначения. Одним из главных достоинств стальных конструкций является их высокая надежность в эксплуатации. Обеспечение высокой надежности обусловлено: пластичностью, вязкостью, однородностью и надежным контролем при изготовлении. Высокая пластичность стали позволяет претерпевать значительные остаточные деформации перед разрушением, не образуя трещины, а вязкость позволяет поглощать механическую энергию в пластически деформируемых объемах. При этом вязкость и хрупкость не являются неизменяемыми свойствами, и сталь под влиянием ряда обстоятельств может переходить из деформационного состояния в хрупкое. Это связано с: эксплуатацией при низких температурах, некачественным химическим составом стали, крупнозернистостью, динамическими воздействиями и изъянами в конструктивной форме [1].

Цель

Таким образом целью настоящей работы был анализ распространения трансхрусталлитного и интерхрусталлитного скола в бейнитных структурах и методов получения структуры с достаточно сложной иерархией для остановки хрупкой трещины.

Анализ

Наблюдения показали, что в случае хрупкого разрушения (скола) трещина распространяется непосредственно через пакеты бейнита [5]. В дальнейшем аналогичные результаты были получены и для наплавленного металла [8].

Наличие структуры нижнего бейнита в сталях практически не сказывается на сопротивлении хрупкому

разрушению. А наличие структуры верхнего бейнита резко повышает порог хладноломкости и снижает работу распространения трещины [2].

Хрупкая трещина возникает при образовании опасных пиковых напряжений в скоплении дислокаций у препятствий. Если препятствия полупроницаемы, то релаксация пиковых напряжений может происходить путем передачи деформаций в соседние конгломераты, когда дислокации из скоплений переходят через препятствия в эти конгломераты. Такое взаимодействие относится к малоугловым и среднеугловым границам, в данном случае опасность возникновения хрупкой трещины уменьшается [4].

Сопротивление хрупкому разрушению в сверхнизкоуглеродистых бейнитных структурах зависит от прочности и типа структуры, поэтому содержание марганца в них повышено до 4,5%, а также применяется микролегирование ниобием и ванадием.

Распространению трещины способствует случай, когда пластины феррита находятся в пределах пакета бейнита, поэтому соприкасаются друг с другом одинаково ориентируемыми границами на многочисленных участках. Даже если соседние пакеты бейнита имеют различную ориентацию существует высокая вероятность, что плоскости спаянности достаточно параллельны [6,7]. Что и обусловило тенденцию к достижению сложной иерархии структуры стали.

Внутри бывшего зерна аустенита в процессе охлаждения образуются пакеты бейнита с параллельными иглами, которые вытянуты в одном направлении. Каждая игла разделяется на блоки, которые, в свою очередь, разделяются дислокационными границами. В связи с этим при распространении хрупкой трещины она будет терять энергию и затухать на границах зерен, вследствие чего трещина будет увязать внутри тела структуры.



Рис. 1: Схематическое изображение участка микроструктуры стали.

На рисунке 1 показана иерархия зерна, где границы аустенитного зерна являются высокоугловыми (15°), так же высокоугловыми являются границы пакетов, а границы между пакетами и блоками – малоугловые ($1-2^\circ$).

Увеличение прочностных и вязких характеристик стали с повышенным содержанием ферритных зерен, имеющих внутреннюю субструктуру, в промышленных условиях затруднительно, так как для этого требуется резкое снижение температуры конца прокатки, что приводит к снижению производительности прокатных станов до 40%. Поэтому альтернативой является закалка с температуры конца прокатки с целью получения структуры малоуглеродистого реечного мартенсита.

В такой структуре направление распространения транскристаллитного скола ориентировано по большей части вдоль длинной оси сечения ферритного зерна, что

обусловлено относительной легкостью распространения трещины вдоль бывших реек мартенсита. Зарождение трещины интеркристаллитных и транскристаллитных сколов тормозится в конгломератах, примыкающих к зонам локальной пластической деформации, где образуются участки чашечной составляющей [3].

Рассмотренные строительные стали характеризуются сложной иерархией, получение которой возможно при подвергании стали прокатному нагреву после прокатки и при использовании легирования. Это снижает порог хладноломкости, увеличивает сопротивление стали хрупкому разрушению, что обусловлено измельчением структуры и повышением комплекса механических свойств стали.

Выводы

В результате закалки формируются структуры игольчатого феррита и реечного мартенсита с высокоугловыми и малоугловыми границами. Мартенсит образуется в низкоуглеродистых сталях, в определенных сплавах. Игольчатый феррит образуется при содержании углерода значительно меньше 0,1%. Они имеют весьма дисперсную структуру и сложную иерархию зерна вследствие регламентированной прокатки и последующей термической обработке, что и придает им высокое сопротивление хрупкому разрушению.

В данной работе проведен анализ распространения хрупкой трещины в промежуточных структурах. Установлено преимущество сталей со сложной иерархией зерна, таких как: игольчатый феррит, малоуглеродистый реечный мартенсит, что позволяет подавлять хрупкую трещину при ее распространении в теле структуры.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Большаков В.И. Использование сталей повышенной прочности в новом высотном строительстве и реконструкции/ В. И. Большаков, О.В. Разумова – Днепропетровск: Пороги, 2008. – 214 с.
2. Большаков В.И. Основы формообразования стальных каркасов многоэтажных и высотных зданий./ В. И. Большаков, М.М. Жербин, О.В. Разумова- Днепропетровск: ПГАСА, 2004. – 132с.
3. Большаков В.И. Термомеханическая обработка конструкционных сталей/ В. И. Большаков, О.В. Разумова – Канада, Бразилиан пресс, 1998 – 336 с.
4. Большаков В.И. Упрочнение строительных сталей. Днепропетровск: СІС, 1993. – 332 с.
5. Pickering, F. B. Transformations and Hardenability in Steels. USA, 1967. - 109-132 p.
6. H.K.D.H. Bhadeshia Bainite in Steels/The University Press: Cambridge, 2001.- 237 p.
7. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in Steels. Ldn: Inst. Mater. Cambridge, 1992. 245 p.
8. Chandel, R. S., Orr, R. F., Gianetto, J. A., McGrath, J. T., Patchett, B. M. and Bicknell, A. C. *The Microstructure and Mechanical Properties of Narrow Gap Welds in 2.25Cr-1Mo Steel*, Report ERP/PMRL 85-16(OP-J) of the Physical Metallurgy Research Laboratories, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, Canada (1985).
9. Большаков В. И. Игольчатый феррит строительных сталей: монография / В. И. Большаков, В. И. Куксенко. - Днепропетровск : ПГАСА, 2012. - 134 с.
10. DeArdo A. J. Modern thermomechanical processing of microalloyed steel // *Microalloying'95*. –1995. – P. 15 – 35.
11. Bardgett W. E., Reeve L. Mechanical properties of low-carbon, low- alloy steels containing boron — *J. Iron and Steel Inst.*, 1949, v. 163, No. 11, p. 277—294.

REFERENCES

1. Bolshakov V.I. The use of high-strength steels in the new building construction and renovation / V.I. Bolshakov, O.M. Razumova - Dnepropetrovsk: Grani, 2008. – 214 p.
2. Bolshakov V.I. Basics of shaping steel-framed multi-storey and high-rise buildings. / V.I. Bolshakov, M.M. Zherbin, O.V. Razumova - Dnepropetrovsk: PGASA, 2004. – 131 p.
3. Bolshakov V.I. Thermomechanical processing of structural steels / V.I. Bolshakov, O.V. Razumova - Canada, Brazilian press, 1998 - 336 p.
4. Bolshakov V. I. the Hardening of structural steel. Dnepropetrovsk: SICH, 1993. – 332 p.
5. Pickering, F. B. Transformations and Hardenability in Steels. USA, 1967. - 109-132 p.
6. H.K.D.H. Bhadeshia Bainite in Steels/The University Press: Cambridge, 2001.- 237 p.
7. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in Steels. Ldn: Inst. Mater. Cambridge, 1992. 245 p.

8. Chandel, R. S., Orr, R. F., Gianetto, J. A., McGrath, J. T., Patchett, B. M. and Bicknell, A. C. *The Microstructure and Mechanical Properties of Narrow Gap Welds in 2.25Cr-1Mo Steel*, Report ERP/PMRL 85-16(OP-J) of the Physical Metallurgy Research Laboratories, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, Canada (1985).
9. Bol'shakov V.I. and Kuksenko V.I. *Igol'chaty ferrit stroitel'nykh staley*[Acicular ferrite of construction steels]. Dnepropetrovsk: PGASA, 2012, 134 p. (in Russian).
10. DeArdo A. J. Modern thermomechanical processing of microalloyed steel // *Microalloying'95. –1995. – P. 15 – 35.*
11. Bardgett W. E., Reeve L. Mechanical properties of low-carbon, low- alloy steels containing boron — *J. Iron and Steel Inst.*, 1949, v. 163, No. 11, p. 277—294.

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, В.И. Большаковым и д-ром техн. наук, Д.В. Лаухиным (Украина)