

УДК 669.14+621.785

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.1.58

ВЛИЯНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ ЗАКАЛЁННОЙ НА АУСТЕНИТ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ НИЗКОЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Калинин Ю.А.¹, Петришинец И.², Ефременко В.Г.³, Капустян А.Е.⁴, Брыков М.Н.⁴

¹ ПАТ «Запорожтрансформатор»,

² Институт материаловедения Словацкой академии наук,

³ ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»,

⁴ Национальный университет «Запорожская политехника»

Аннотация. Образцы высокоуглеродистой низколегированной стали 120Г3С2 (1,21 % С; 2,56 % Мп; 1,59 % Si масс.) закалены от 900 °С и выдержаны при 250 °С от 1 до 12 часов. Микроструктура материала после указанной обработки состоит из аустенита, отпущенного мартенсита, карбидов и бейнита различной морфологии. Количество бейнита значительно увеличивается при продлении времени изотермической выдержки

Ключевые слова: высокоуглеродистая низколегированная сталь, закалка, изотермическая выдержка, микроструктура, бейнит, аустенит, отпущенный мартенсит.

Введение

Изотермическая обработка сплавов различных систем легирования широко используется для улучшения их свойств. В качестве примеров можно привести отпуск сталей после закалки, старение сталей, дуралюминов и других сплавов, обработку закалённых сталей на бейнит.

В настоящей работе исследовано влияние изотермической обработки на микроструктуру закалённой высокоуглеродистой низколегированной стали – нового материала, обладающего высокой износостойкостью в условиях абразивного изнашивания. Отличительной особенностью работы является малое время изотермической выдержки для данного материала.

Анализ публикаций

Изотермическая обработка аустенита при температурах бейнитного превращения длительное время привлекает внимание исследователей [1–5]. Затраты на изотермическую выдержку компенсируются значительным повышением комплекса свойств материала после обработки [6–9]. По мере увеличения содержания углерода в аустените температура начала бейнитного превращения B_s снижается [10], что приводит к необходимости снижать температуру изотермической выдержки. Снижение температуры в свою очередь значительно увеличивает время, необходимое для завершения превращения, поэтому изотермическая обработка высокоуглеродистого аустенита требует точного определения оптимальной температуры процесса.

Ускорение бейнитного превращения возможно за счет небольшого количества мартенсита [11–14], что обеспечивается закалкой до температуры на 10–20 °С ниже температуры начала мартенситного превращения. Этот приём оказывается особенно эффективным для ускорения бейнитного превращения аустенита с высоким содержанием углерода (1,2 %). В работах [15–17] исследована кинетика бейнитного превращения аустенита сталей 120Г3 и 120Г3С2.

Показано, что за счет небольшого количества мартенсита можно добиться снижения времени до завершения превращения с 50 до 1 суток при температуре выдержки 250 °С. Это даёт возможность практического использования изотермического бейнитного превращения для улучшения свойств высокоуглеродистых низколегированных сталей.

Ценность вышеупомянутых материалов связана с возможностью получать нестабильный аустенит после закалки от 900–1000 °С. При пластической деформации нестабильного аустенита происходит его превращение в мартенсит деформации, что увеличивает твёрдость материала до уровня 1200 HV [18–21]. При абразивном изнашивании пластическая деформация (царапание), последующее фазовое превращение и повышение твёрдости происходят в тонком поверхностном слое материала, что значительно увеличивает износостойкость. Появляется возможность использовать защитные износостойкие накладки на изделия в местах, наиболее подверженных абразивному изнашиванию.

В работе [22] предложен способ сварки закалённых высокоуглеродистых низколегированных сталей, в частности стали 120Г3С2. Суть способа – ускоренное охлаждение свариваемых элементов, что обеспечивает в зоне термического влияния (ЗТВ) закалку, аналогичную закалке основного материала. Структура ЗТВ после сварки с ускоренным охлаждением – аустенит, карбиды и мартенсит. В связи с этим логично предположить, что изотермическая обработка изделия при температуре около 250 °С после сварки с ускоренным охлаждением позволит получить в ЗТВ структуру бейнита с сопутствующим улучшением механических свойств. Одновременно бейнитное превращение произойдёт и в основном материале, что также положительно отразится на его эксплуатационных характеристиках. Поскольку с практической точки зрения даже выдержка в течение одних суток может оказаться неприемлемо длительной операцией, следует уменьшить время изотермической выдержки настолько, насколько возможно. Для этого необходимо исследовать структурообразование материала ЗТВ стали 120Г3С2 после закалки с ускоренным охлаждением на ранних стадиях изотермической выдержки. Поскольку структура закалённой стали 120Г3С2 после сварки с ускоренным охлаждением идентична для ЗТВ и остальных участков детали, исследования проведены не на сварных соединениях, а на обычных образцах стали 120Г3С2.

Цель и постановка задачи

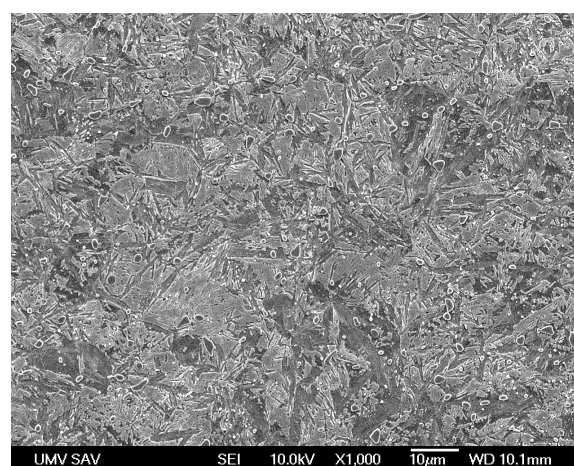
Цель работы – исследование изменения микроструктуры стали 120Г3С2 после закалки от 900 °С на ранних стадиях изотермической выдержки при 250 °С. Задачи: определить характерные особенности микроструктуры закалённой стали 120Г3С2 после изотермических выдержек в течение различного времени. По результатам исследований рекомендовать достаточное время изотермической обработки.

Методы и результаты исследования

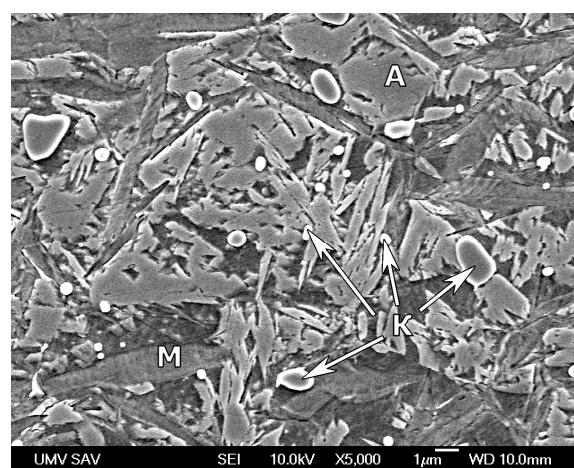
Эксперименты проведены на образцах, вырезанных из полосы стали 120Г3С2 промышленного изготовления толщиной 5 мм [23]. Химический состав стали, масс. %: С – 1,21; Mn – 2,56; Si – 1,59; остальное – примеси в допустимых пределах. Нагрев под закалку и изотермическую выдержку проводили в печи сопротивления в воздушной атмосфере. Полоса стали размерами 300 x 60 x 5 мм закалена от 900 °С в воду комнатной температуры. Выдержка при температуре нагрева под закалку

30 мин. После закалки из полосы вырезаны образцы размерами 25 x 10 x 5 мм. Образцы подвергнуты изотермической выдержке при 250 °С в течение 1, 2, 3, 6 и 12 ч. Микроструктуру образцов исследовали со стороны поперечного сечения полосы приблизительно в центре, что позволило исследовать необезуглерожженный материал. Исследования микроструктуры проведены с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM-7000F. Для измерения твёрдости использован компьютеризированный твердомер Wilson® Hardness, нагрузка на индентор 500 г. Твёрдость определяли как среднее из 30 измерений.

Для стали указанного состава температура 900 °С соответствует двухфазной области между A_1 и $A_{сг}$. Об этом свидетельствуют нерастворившиеся при нагреве карбиды (рис. 1).



а

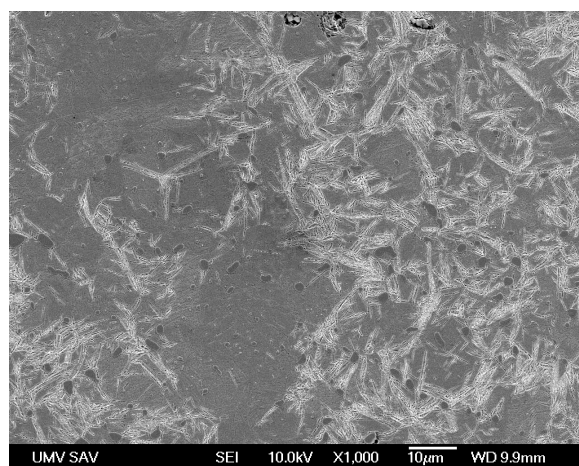


б

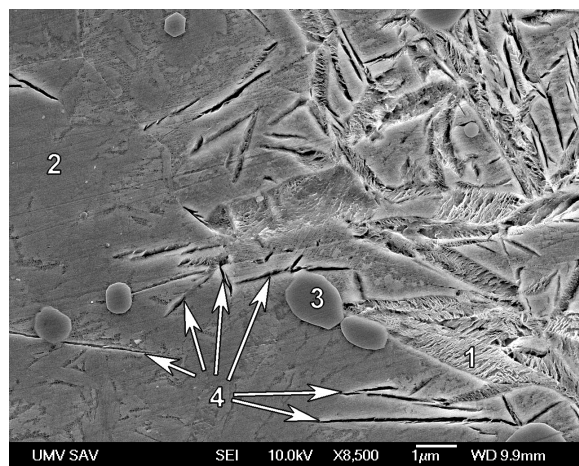
Рис. 1. Микроструктура после закалки от 900 °С; а – x1000, б – x5000; М – мартенсит, А – аустенит, К – карбиды

После изотермической выдержки 1 ч (рис. 2) в структуре наряду с отпущенным мартенситом 1, аустенитом 2 и карбидами 3

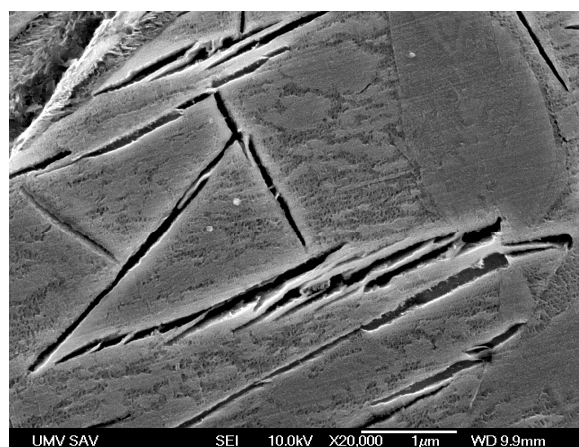
наблюдается некоторое количество бейнитного феррита 4 характерной морфологии.



а



б

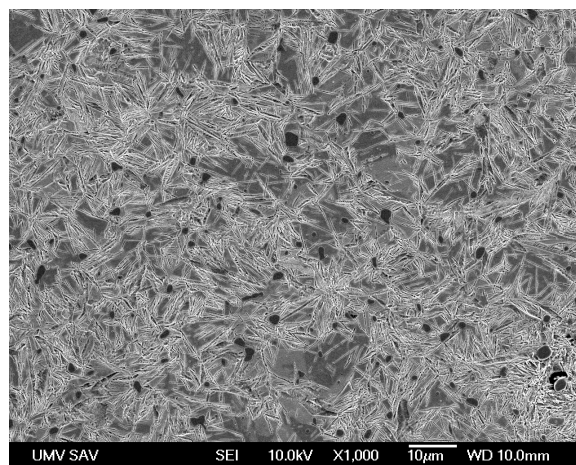


в

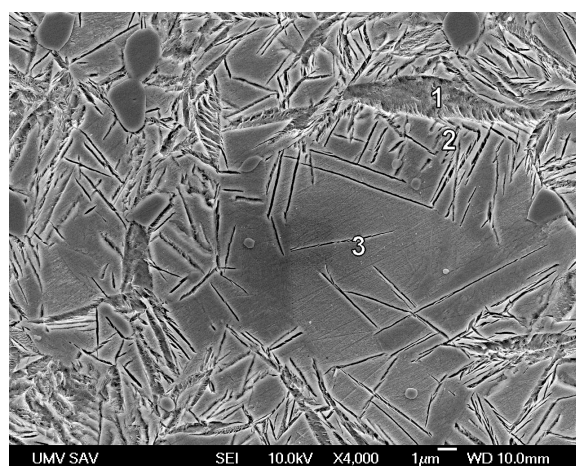
Рис. 2. Микроструктура после изотермической выдержки 1 ч; а – $\times 1000$, б – $\times 8500$, в – $\times 20000$; 1 – отпущенный мартенсит, 2 – аустенит, 3 – карбид, 4 – бейнитный феррит

Таким образом, установлено, что бейнитное превращение начинается не позже, чем через 1 ч изотермической выдержки. При увеличе-

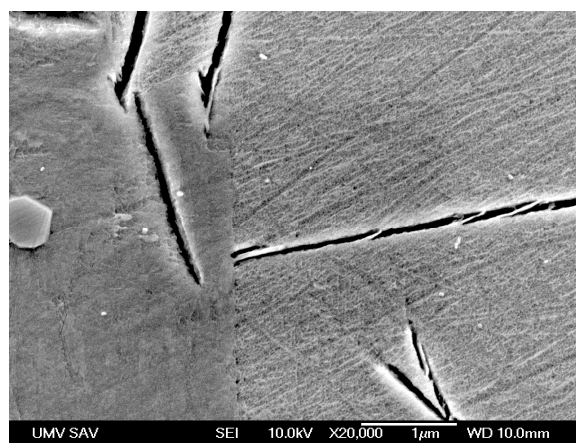
нии времени выдержки до 2 ч (рис. 3) количество бейнитного феррита в структуре увеличивается.



а



б



в

Рис. 3. Микроструктура после изотермической выдержки 2 ч; а – $\times 1000$, б – $\times 4000$, в – $\times 20000$; 1 – отпущенный мартенсит, 2 – множественные пластины бейнитного феррита вблизи мартенсита, 3 – единичные пластины бейнитного феррита на значительном расстоянии от мартенсита

Необходимо отметить преимущественное выделение бейнитного феррита вблизи отпущенного мартенсита 1 (рис. 3, б).

В области 2 бейнитный феррит наблюдается в относительно большом количестве, в области 3 присутствуют лишь единичные пластины. Это наглядно иллюстрирует роль мартенсита как катализатора бейнитного превращения.

В структуре материала после выдержки 3 ч (рис. 4) появляется качественно новый объект: отпущенный мартенсит 1 с нехарактерно изогнутыми границами 2 и прилегающими участками некоторой пластинчатой структуры 3. Структура 3 настолько дисперсна, что отчетливо разрешается только при увеличениях более $\times 10000$ (рис. 4, в). Межпластинчатое расстояние – менее 100 нм. Данная наноструктура предположительно может быть идентифицирована как *columnar bainite* [10].

Дальнейшее увеличение времени изотермической выдержки приводит к увеличению количества пластин бейнитного феррита и увеличению площади наноструктурного *columnar bainite* (рис. 5, 6). Границы наноструктурного бейнита в некоторых случаях специфически изогнуты (см. рис. 5, б, в), что позволяет визуально отличить его от отпущенного мартенсита.

Зависимость твердости закаленной стали 120Г3С2 от времени изотермической выдержки (рис. 7) свидетельствует о том, что на ранних стадиях выдержки (до 1 ч) твердость материала снижается, несмотря на очевидное начало бейнитного превращения. Вероятнее всего, снижение твердости связано с отпуском мартенсита.

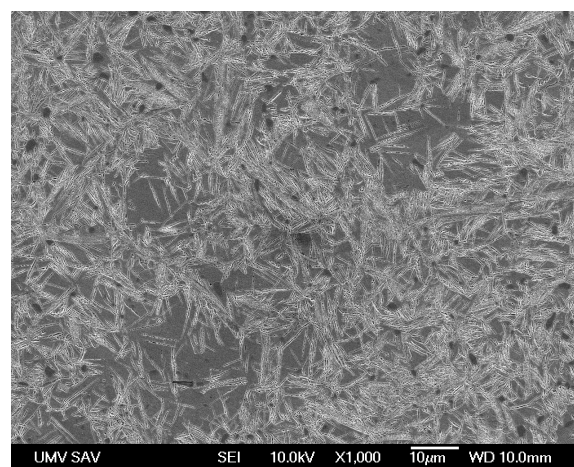
Увеличение времени выдержки ожидаемо приводит к увеличению твердости, связанному с бейнитным превращением.

По данным работ [16, 17] дальнейшее увеличение времени выдержки также приведет к увеличению твердости. Завершение бейнитного превращения в данном случае происходит через 1–2 суток.

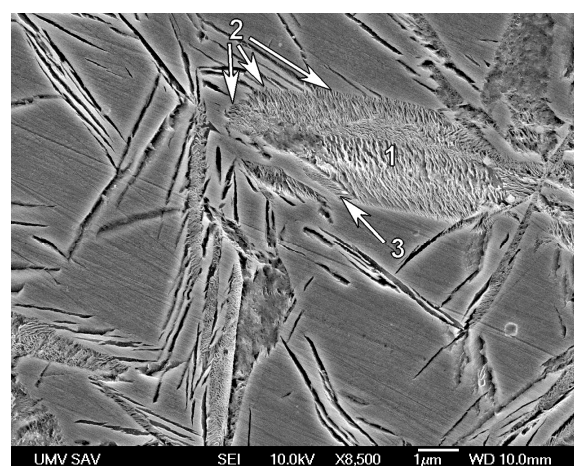
Тем не менее, выдержка до 6–7 ч (не более 1 рабочей смены) может быть вполне достаточной для улучшения механических свойств и обеспечения эксплуатационной надёжности как основного материала, так и сварных соединений из закаленной стали 120Г3С2.

Дальнейшая работа может быть направлена на исследование влияния изотермической выдержки на свойства сварных соединений закаленных высокоуглеродистых низколегированных сталей. Также значительный науч-

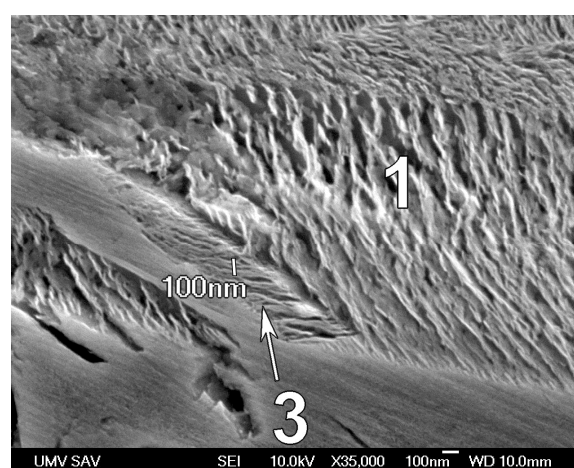
ный интерес представляют исследования наноструктурированного бейнита и потенциальных возможностей его практического применения.



а

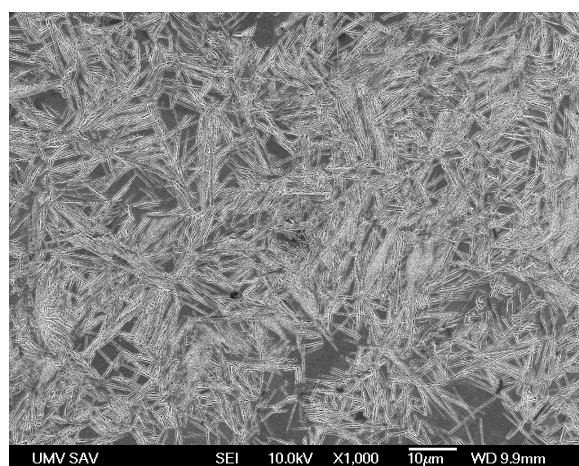


б

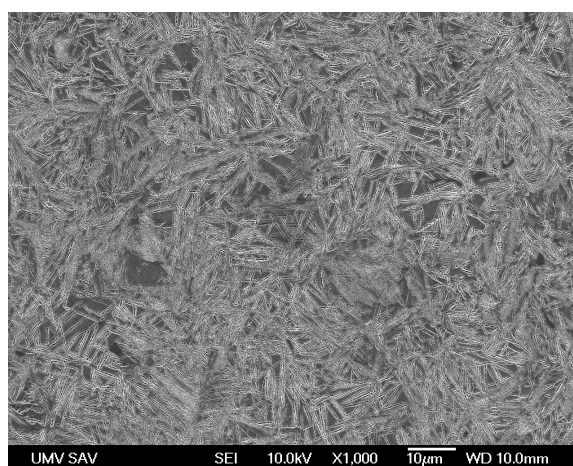


в

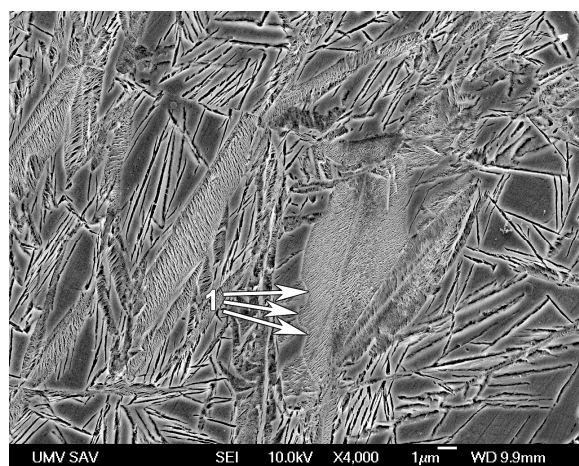
Рис. 4. Микроструктура после изотермической выдержки 3 ч; а – $\times 1000$, б – $\times 8500$, в – $\times 35000$



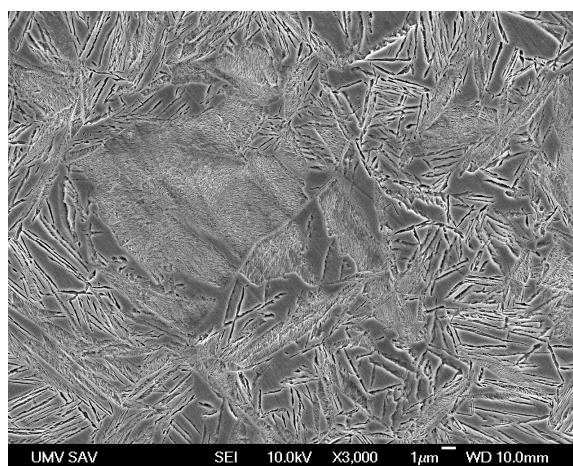
а



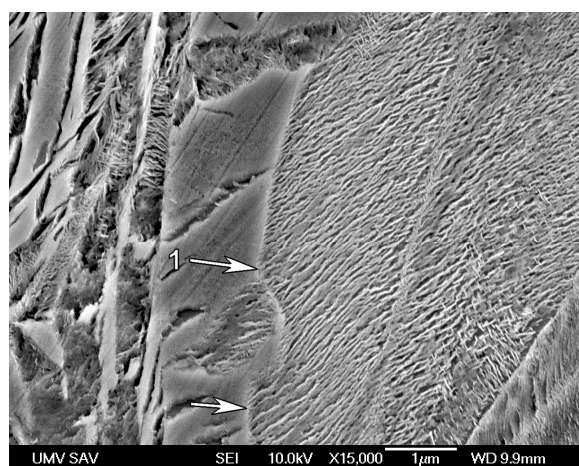
а



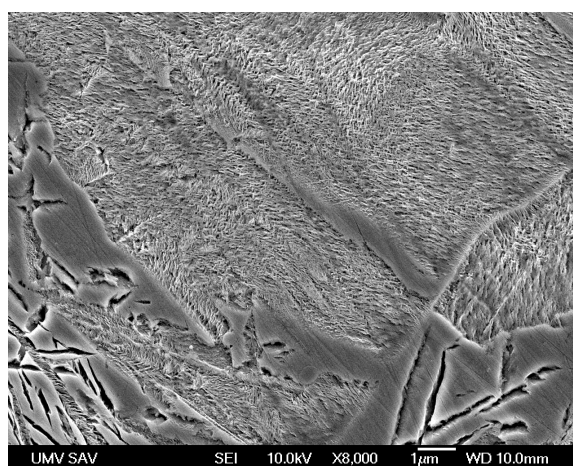
б



б



в



в

Рис. 5. Микроструктура после изотермической выдержки 6 ч; а – x1000, б – x8500, в – x35000; 1 – граница наноструктурного бейнита

Рис. 6. Микроструктура после изотермической выдержки 12 ч; а – x1000, б – x3000, в – x8000

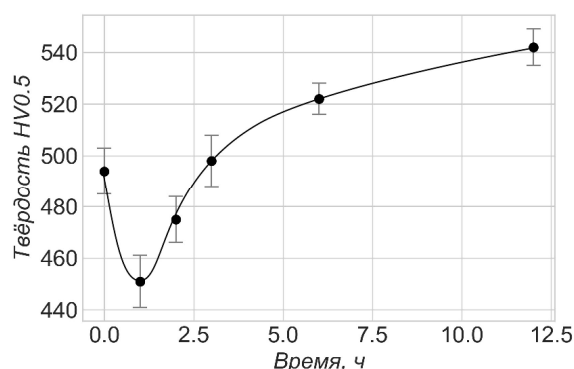


Рис. 7. Изменение твёрдости стали 120Г3С2 после заковки от 900 °С и изотермических выдержек при 250 °С в исследованном временном диапазоне

Выводы

По результатам исследования влияния изотермической обработки закалённой на аустенит высокоуглеродистой низколегированной стали могут быть сформулированы следующие выводы.

1. Бейнитное превращение начинается менее чем через 1 ч после начала изотермической выдержки. Через 1 ч в структуре наблюдаются множественные выделения бейнитного феррита игольчатой морфологии, расположенные вблизи отпущенного мартенсита.

2. Наряду с бейнитным ферритом игольчатой морфологии при изотермической выдержке формируются участки гораздо более дисперсного бейнита с межпластинчатым расстоянием значительно менее 100 нм.

3. Твёрдость материала изменяется по кривой с минимумом, соответствующем выдержке 1 ч. При этом процессы отпуска мартенсита уже завершены, а начавшееся бейнитное превращение входит в стадию ускоренного развития.

4. Поскольку структура закалённой на аустенит стали 120Г3С2 очень существенно изменяется в исследованном временном диапазоне, дальнейшая работа может быть направлена на изучение изменения механических свойств материала и качества сварного соединения после изотермической выдержки до 6–7 ч.

Литература

- Hultgren A. A. Metallographic Study on Tungsten Steels // John Wiley. – New York, 1920. – 186 p.
- Robertson J.M. The microstructure of rapidly cooled steel // Journal of the Iron and Steel Institute. – 1929. – V. 119. – P. 391–419.
- Davenport E.S., Bain E.C. Transformation of Austenite at Constant Subcritical Temperatures // Trans. AIME. – 1930. – V. 90. – P. 117–154.

- Bhadeshia, H.A. Personal Commentary on «Transformation of Austenite at Constant Subcritical Temperatures» // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2010. – V. 41. – P. 701–740. DOI: 10.1007/s11663-010-9371-7.
- Hillert M. Discussion of «A Personal Commentary on Transformation of Austenite at Constant Subcritical Temperatures» // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2011. – V. 42. – P. 541–542. DOI: 10.1007/s11661-010-0586-7.
- Barbacki A. The role of bainite in shaping mechanical properties of steels // Journal of Materials Processing Technology. – 1995. – V. 53. – P. 57–63. DOI: 10.1016/0924-0136(95)01961-D.
- Caballero F.G. Bhadeshia H.K.D.H. Very strong bainite // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 2004. – V. 8. – P. 251–257. DOI: 10.1016/j.cossms.2004.09.005.
- Morales-Rivas L., Yen H.-W., Huang B.-M., Kuntz M., Caballero F. G., Yang J.-R., Garcia-Mateo C. Tensile response of two nano-scale bainite composite-like structures // JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society. – 2015. – V. 67. – P. 2223–2235. DOI: 10.1007/s11837-015-1562-x.
- Zhao J., Zhao X., Dong C., Zhao X., Kang S. Effect of bainitic transformation combined with hot forming on the microstructure and mechanical properties of bainite-martensite multiphase steel // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – V. 731. – P. 102–106. DOI: 10.1016/j.msea.2018.05.111.
- Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in Steels: Theory and Practice, Third Edition. – CRC Press, Boca Raton, 2015. – 616 p.
- Jellinghaus W. Anregung der Zwischenstufen-Umwandlung des Stahles durch kleine Mengen von α -Eisen // Arch. Eisenhütt. – 1952. – V. 23. – P. 459–470. DOI: 10.1002/srin.195200972.
- Toji Y., Matsuda H., Raabe D. Effect of Si on the acceleration of bainite transformation by pre-existing martensite // Acta Materialia. – 2016. – V. 116. – P. 250–262. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.06.044.
- Gong W., Tomota Y., Harjo S., Su Y.H., Aizawa K. Effect of prior martensite on bainite transformation in nanobainite steel // Acta Materialia. – 2015. – V. 85. – P. 243–249. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.11.029.
- Zhou P., Guo H., Zhao A., Yin Z., Wang J. Effect of pre-existing martensite on bainitic transformation in low-temperature bainite steel // Materials Science Forum. – 2017. – V. 898. – P. 803–809. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.898.803.
- Коваль А.Д., Брыков М.Н., Капустян А.Е., Тимофеев Д.Н. Исследование кинетики образования нижнего бейнита в структуре высокоуглеродистой низколегированной стали // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2011. – № 1. – С. 17–21.

16. Hesse O., Liefelth J., Kunert M., Kapustyan A., Brykov M., Efremenko V. Bainite in Stählen mit hohem Widerstand gegen Abrasivverschleiß // *Tribologie + Schmierungstechnik*. – V. 63. – 2016. – № 2. – S. 5–13.
17. Брыков М.Н., Прокопченко А.А., Ефременко В.Г. Влияние режимов закалки и изотермической обработки на структуру и износостойкость высокоуглеродистой низколегированной стали // *Проблеми трибології (Problems of Tribology)*. – 2016. – № 3. – С. 44–51.
18. Брыков Н.Н. Исследование влияний структуры на сопротивляемость сплавов абразивному изнашиванию: дис. ... кандидата техн. наук: 05.02.01. – Запорожье, 1966. – 144 с.
19. Попов В.С., Брыков Н.Н., Дмитриченко Н.С. Износостойкость пресс-форм огнеупорного производства. – Москва: Металлургия, 1971. – 160 с.
20. Долговечность оборудования огнеупорного производства / В.С. Попов и др. – Москва: Металлургия, 1978. – 232 с.
21. Hesse O., Merker J., Brykov M., Efremenko V. Zur Festigkeit niedriglegierter Stähle mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt gegen abrasiven Verschleiß // *Tribologie + Schmierungstechnik*. – 2013. – № 6. – S. 37–43.
22. Калинин Ю.А., Шумилов А.А., Петришинец И., Ефременко В.Г., Брыков М.Н. Структура околосварочной зоны закаленной высокоуглеродистой стали после сварки с ускоренным охлаждением // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2019. – №1. – С. 31–36.
23. Two-body abrasion resistance of high-carbon high-silicon steel: metastable austenite vs nanostructured bainite / V.G. Efremenko, O. Hesse, T. Friedrich, M. Kunert, M.N. Brykov, K. Shimizu, V.I. Zurnadzy, P. Šuchmann // *Wear*. – 2019. – V. 418–419. – P. 24–35. DOI: 10.1016 / j.wear. 2018.11.003.
6. Barbacki A. The role of bainite in shaping mechanical properties of steels // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1995. – V. 53. – P. 57–63. DOI: 10.1016/0924-0136(95)01961-D.
7. Caballero F.G. Bhadeshia H.K.D.H. Very strong bainite // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. – 2004. – V. 8. – P. 251–257. DOI: 10.1016 / j.cossms. 2004.09.005.
8. Morales-Rivas L., Yen H.-W., Huang B.-M., Kuntz M., Caballero F. G., Yang J.-R., Garcia-Mateo C. Tensile response of two nano-scale bainite composite-like structures // *JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. – 2015. – V. 67. – P. 2223–2235. DOI: 10.1007/s11837-015-1562-x.
9. Zhao J., Zhao X., Dong C., Zhao X., Kang S. Effect of bainitic transformation combined with hot forming on the microstructure and mechanical properties of bainite-martensite multiphase steel // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – V. 731. – P. 102–106. DOI: 10.1016/j.msea. 2018.05.111.
10. Bhadeshia H.K.D.H. Bainite in Steels: Theory and Practice, Third Edition. – CRC Press, Boca Raton, 2015. – 616 p.
11. Jellinghaus W. Anregung der Zwischenstufen-Umwandlung des Stahles durch kleine Mengen von α -Eisen // *Arch. Eisenhütt.* – 1952. – V. 23. – P. 459–470. DOI: 10.1002/srin.195200972.
12. Toji Y., Matsuda H., Raabe D. Effect of Si on the acceleration of bainite transformation by pre-existing martensite // *Acta Materialia*. – 2016. – V. 116. – P. 250–262. DOI: 10.1016/j. actamat. 2016.06.044.
13. Gong W., Tomota Y., Harjo S., Su Y.H., Aizawa K. Effect of prior martensite on bainite transformation in nanobainite steel // *Acta Materialia*. – 2015. – V. 85. – P. 243–249. DOI: 10.1016/j. actamat. 2014.11.029.
14. Zhou P., Guo H., Zhao A., Yin Z., Wang J. Effect of pre-existing martensite on bainitic transformation in low-temperature bainite steel // *Materials Science Forum*. – 2017. – V. 898. – P. 803–809. DOI: 10.4028 / www.scientific.net / MSF.898.803.
15. Koval' A.D., Brykov M.N., Kapustyan A.E., Timofeenko D.N. Issledovanie kinetiki obrazovaniya nizhnego bejnita v strukture vysokouglerodistoj nizkolegированной stali // *Novi materialy i tekhnologiyi v metalurgiyi ta mashynobuduvanni*. – 2011. – № 1. – S.17–21.
16. Hesse O., Liefelth J., Kunert M., Kapustyan A., Brykov M., Efremenko V. Bainite in Stählen mit hohem Widerstand gegen Abrasivverschleiß // *Tribologie + Schmierungstechnik*. – V. 63. – 2016. – № 2. – S. 5–13.
17. Brykov M.N., Prokopchenko A.A., Efremenko V.G. Vliyanie rezhimov zakalki i izotermicheskoy obrabotki na strukturu i iznosostojkost vysokouglerodistoj nizkolegированной stali // *Problemi tribologiyi (Problems of Tribology)*. – 2016. – № 3. – S.44–51.

References

1. Hultgren A. A. Metallographic Study on Tungsten Steels // *John Wiley*. – NewYork, 1920. – 186 p.
2. Robertson J.M. The microstructure of rapidly cooled steel // *Journal of the Iron and Steel Institute*. – 1929. – V. 119. – P. 391–419.
3. Davenport E.S., Bain E.C. Transformation of Austenite at Constant Subcritical Temperatures // *Trans. AIME*. – 1930. – V. 90. – P. 117–154.
4. Bhadeshia, H.A. Personal Commentary on «Transformation of Austenite at Constant Subcritical Temperatures» // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2010. – V. 41. – P. 701–740. DOI: 10.1007 / s11663-010-9371-7.
5. Hillert M. Discussion of «A Personal Commentary on Transformation of Austenite at Constant Subcritical Temperatures» // *Metallurgical and Materials Transactions A*. – 2011. – V. 42. – P. 541–542. DOI: 10.1007 / s11661-010-0586-7.

18. Brykov N.N. Issledovanie vliyanij struktury na soprotivljaemost' splavov abrazivnomu iznashivaniyu: dis. ... kandidata tehn. nauk: 05.02.01. – Zaporozh'e, 1966. – 144 s.
19. Popov V.S., Brykov N.N., Dmitrichenko N.S. Iznosostojkost' pressform ognepurnogo proizvodstva. – Moskva: Metallurgija, 1971. – 160 s.
20. Dolgovechnost' oborudovanija ognepurnogo proizvodstva / V.S. Popov i dr. – Moskva: Metallurgija, 1978. – 232 s.
21. Hesse O., Merker J., Brykov M., Efremenko V. Zur Festigkeit niedriglegierter Stähle mit erhöhtem Kohlenstoffgehalt gegen abrasiven Verschleiß // Tribologie + Schmierungstechnik. – 2013. – № 6. – S. 37–43.
22. Kalinin Yu.A., Shumilov A.A., Petri-shinecz I., Efremenko V.G., Brykov M.N. Struktura okoloshovnoj zony zakalynnoj vysokouglerodistoj stali posle svarki s uskorennyim okhlazhdeniem // Novi materialy i tekhnologiji v metalurgiji ta mashynobuduvanni. – 2019. – № 1. – S. 31–36.
23. Two-body abrasion resistance of high-carbon high-silicon steel: metastable austenite vs nanostructured bainite / V.G. Efremenko, O. Hesse, T. Friedrich, M. Kunert, M.N. Brykov, K. Shimizu, V.I. Zurnadzhly, P. Šuchmann // Wear. – 2019. – V. 418–419. – P. 24–35. DOI: 10.1016/j.wear.2018.11.003.

Калинин Юрий Анатольевич, заместитель начальника центрального диспетчерского отдела, тел. +38-061-270-33-09, e-mail: kalininurij16@gmail.com, ЧАО «Запорожтрансформатор», 3, ул. Днепровское шоссе, г. Запорожье, 69600, Украина.

Петришинец Иван, PhD, научный сотрудник отдела микроструктурной инженерии сталей, тел. +421-55-7922-448, e-mail: petryshynets@imr.saske.sk, Институт материаловедения Словацкой академии наук, 47, Watsonova, г. Кошице, 04001, Словакия.

Ефременко Василий Георгиевич, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой физики, тел. +38-062-944-61-31, e-mail: efremenko_v_g@pstu.edu, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», 7, ул. Университетская, г. Мариуполь, 87555, Украина.

Капустян Алексей Евгеньевич, к.т.н., доцент кафедры оборудования и технологии сварочного производства, тел. +38-061-769-82-62, e-mail: kafedra_otzv@zntu.edu.ua, Национальный университет «Запорожская политехника», 64, ул. Жуковского, г. Запорожье, 69063, Украина.

Брыков Михаил Николаевич, д.т.н., профессор кафедры оборудования и технологии сварочного производства, тел. +38-061-769-82-62, e-mail: brykov@zntu.edu.ua, Национальный университет «Запорожская политехника», 64, ул. Жуковского, г. Запорожье, 69063, Украина.

Influence of isothermal treatment on the microstructure of high-carbon low-alloyed steel hardened on austenite

Abstract. High-carbon low-alloyed steels are promising materials to increase abrasive wear resistance of machine parts working under severe wear caused by hard particles. These steels being quenched from 900–1000 °C possess mostly retained austenite structure which is capable to transform to martensite in the course of abrasive wear. The isothermal holding is known to serve as very beneficial yet long operation which provides bainite transformation with significant improvement of mechanical properties. The goal of present work was to investigate the changes in microstructure on very beginning of isothermal holding. Samples of high-carbon low-alloyed steel (1,21 % C; 2,56 % Mn; 1,59 % Si mass.) were quenched from 900 °C to obtain in microstructure mostly residual austenite and minor quantity of martensite. Isothermal holdings at 250 °C and time frame from 1 to 12 hrs were made to initiate bainite transformation and investigate the accompanying changes of microstructure. The first investigated microstructure that corresponded to 1 hour holding has revealed distinctive signs of beginning bainite transformation, i.e. long laths of bainitic ferrite which appeared in the vicinity of pre-existed martensite. Additionally another structure was found along with laths of bainitic ferrite after holding during 3 hours and more. The structure appeared as very fine lamellar mixture with interlath space far less than 100 nm. According to known references this structure may be addressed as columnar bainite. «Hardness vs time» dependence of the material in the course of isothermal holding has the minimum after 1 hour holding. At that tempering of martensite is finished and bainite transformation enters its accelerated phase. The future work may be devoted to investigation of developing mechanical properties of 120Mn3Si2 steel and quality of welding joints after isothermal holdings up to 6–7 hours.

Key words: high-carbon low-alloyed steel, quenching, isothermal holding, microstructure, bainite, austenite, tempered martensite.

Kalinin Yuriy, Deputy Head of Central Logistics Department, tel. +38-061- 270-33-09, e-mail: kalini-nurij16@gmail.com, PrJSC «Zaporozhtransformator», 69600, Ukraine, Zaporizhzhya, Dneprovskoe Shosse str., 3.

Petryshynets Ivan, PhD, Scientific Researcher in Department of Microstructural Engineering of Steels, tel. +421-55-7922-448, e-mail: petryshynets@imr.saske.sk, Institute of Materials Research SAS, 040 01, Slovakia, Košice, Watsonova str., 47.

Efremenko Vasily, professor, Doct. of Science, head of Physics Department, tel. +38-062-944-61-31, e-mail: efremenko_v_g@pstu.edu, Priazovskiy State Technical University, 87555, Ukraine, Mariupol, Universitetska str., 7.

Kapustyan Oleksiy, docent, Cand. of Science, Welding Department, tel. +38-061-769-82-62,

e-mail: kafedra_otzv@zntu.edu.ua, National University «Zaporizhzhya Polytechnic», 69063, Ukraine, Zaporizhzhya, Zhukovskogo str., 64.

Brykov Michail, professor, Doct. of Science, Welding Department, tel. +38-061-769-82-62, e-mail: brykov@zntu.edu.ua, National University «Zaporizhzhya Polytechnic», 69063, Ukraine, Zaporizhzhya, Zhukovskogo str., 64.

Вплив ізотермічного оброблення на мікроструктуру загартованої на аустеніт високовуглецевої низьколегованої сталі

Анотація. Високовуглецеві низьколеговані сталі є перспективним матеріалом для підвищення абразивної зносостійкості деталей машин, які зазнають у процесі експлуатації жорсткого зносу твердими частинками. Після гартування від 900–1000 °C у структурі таких сталей залишається багато залишкового аустеніту, що здатен перетворюватись на мартенсит у процесі абразивного зношування. Звісно, що ізотермічне оброблення є корисною, але досить тривалою операцією, під час якої відбувається бейнітне перетворення із значним поліпшенням механічних властивостей. Метою роботи було дослідження змін мікроструктури на самому початку ізотермічної витримки. Зразки високовуглецевої низьколегованої сталі (1,21 % C; 2,56 % Mn; 1,59 % Si мас.) було загартовано від 900 °C з отриманням у структурі здебільши залишкового аустеніту та невеликої кількості мартенситу. Далі проведено ізотермічні витримки за температури 250 °C в діапазоні часу від 1 до 12 год для забезпечення бейнітного перетворення та дослідження супутніх змін мікроструктури. Уже після однієї години витримки в структурі присутні ознаки перетворення, а саме довгі пластини бейнітного фериту, які розташовано біля мартенситних включень. Додатково було виявлено ініцій структурний складник після витримки 3 год і більше – дуже дисперсну пластинчасту суміш із міжпластинчастою відстанню значно менше ніж 100 нм. Згідно з відомими джерелами цією структурою може бути так званий *columnar bainite*. Залежність «твер-

дість – час витримки» для дослідженого матеріалу має мінімум після 1 год витримки. У цей час відпуск мартенситу завершується, а бейнітне перетворення входить до прискореної фази. Подальшу роботу може бути присвячено дослідженню змін механічних властивостей сталі 120Г3С2 та якості зварних з'єднань після ізотермічної витримки до 6–7 год.

Ключові слова: високовуглецева низьколегована сталь, гартування, ізотермічна витримка, мікроструктура, бейніт, аустеніт, відпущений мартенсит.

Калінін Юрій Анатолійович, заступник начальника центрального диспетчерського відділу, тел. +38-061-270-33-09, e-mail: kalininurij16@gmail.com, ПАТ «Запоріжтрансформатор», 3, вул. Дніпровське шосе, м. Запоріжжя, 69600, Україна.

Петришинець Іван, PhD, науковий співробітник відділу мікроструктурної інженерії сталей, тел. +421-55-7922-448, e-mail: petryshynets@imr.saske.sk, Інститут матеріалознавства Словацької академії наук, 47, Watsonova, м. Кошице, 04001, Словаччина.

Єфременко Василь Георгійович, д.т.н., професор, завідувач кафедри фізики, тел. +38-062-944-61-31, e-mail: efremenko_v_g@pstu.edu, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 7, вул. Університетська, м. Маріуполь, 87555, Україна.

Капустян Олексій Євгенович, к.т.н., доцент кафедри обладнання і технології зварювального виробництва, тел. +38-061-769-82-62, e-mail: kafedra_otzv@zntu.edu.ua, Національний університет «Запорізька політехніка», 64, вул. Жуковського, м. Запоріжжя, 69063, Україна.

Брик Миколайович, д.т.н., професор кафедри обладнання і технології зварювального виробництва, тел. +38-061-769-82-62, e-mail: brykov@zntu.edu.ua, Національний університет «Запорізька політехніка», 64, вул. Жуковського, м. Запоріжжя, 69063, Україна.