



Оригинальная статья

УДК 669.14.018.29

DOI 10.17073/0368-0797-2021-3-230-236



АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ГРАФИТИЗИРОВАННОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ ДЕФОРМАЦИИ СЖАТИЕМ В УСЛОВИЯХ КОМНАТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ОБРАТНО РАССЕЯНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Чжан Юн-Цзюнь

Пекинский научно-технический университет (Китайская Народная Республика, 100083, Пекин, район Хайдянь, ул. Сюэюань, 30)

Аннотация. Графитизированная сталь привлекает особое внимание благодаря высокой стойкости против износа, повышенной обрабатываемости резанием и хорошей деформируемости при холодной обработке давлением. В работе проведена пластическая деформация сжатием при комнатной температуре графитизированной стали (0,43 % C) с ферритно-графитной микроструктурой на универсальной испытательной машине. Изучены микроструктуры деформированных образцов с использованием методики анализа картин дифракции обратно рассеянных электронов (*Electron Back-Scattered Diffraction* – EBSD). Исследована эволюция морфологии микроструктуры, текстуры, распределения средних локальных разориентировок (*Kernel Average Misorientations* – KAM) и фактора Тейлора в зоне больших деформаций сжатого образца с различной степенью деформации. Результаты показывают, что исследуемая сталь обладает хорошей способностью к пластической деформации сжатием. С увеличением степени деформации зерна феррита и включения графита вытягиваются в направлении, перпендикулярном оси сжатия, и постепенно переходят из изометрической формы в волокнистую. Ориентировка зерен феррита в матрице очевидна, а ориентировка зерен феррита вокруг включений графита неочевидна, т. е. количество зерен, ориентированных на $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ в матрице намного больше, чем вокруг включений графита. Кроме того, средняя локальная разориентировка и фактор Тейлора в области больших деформаций образцов сжатия показывают, что степень деформации ферритных зерен вокруг включений графита меньше, чем вокруг зерен феррита в матрице. Причина этого сводится к тому, что мягкое включение графита может уменьшать степень скопления дислокаций.

Ключевые слова: графитизированная углеродистая сталь, деформация сжатием, микроструктура, EBSD

Финансирование: Работа осуществлена при поддержке Фонда естественных наук Пекина, КНР (грант № 2172035).

Для цитирования: Чжан Юн-Цзюнь. Анализ микроструктуры графитизированной стали после деформации сжатием в условиях комнатной температуры методом дифракции обратно рассеянных электронов // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 230–236. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-230-236>

Original article

EBSD ANALYSIS OF GRAPHITIZED STEEL MICROSTRUCTURE AFTER COMPRESSION DEFORMATION AT ROOM TEMPERATURE

Zhang Yong-Jun

University of Science and Technology Beijing (30 Syueyuan Str., Khaidian District, Beijing 100083, China)

Abstract. The graphitized steel has attracted considerable attention due to its excellent cutability and good properties at cold forming. Compression deformation at room temperature of graphitized steel (0.43 % C) with a ferrite-graphite microstructure was performed on a universal testing machine. Microstructures of deformed samples were studied using the analysis technique of Electron Back-Scattered Diffraction (EBSD). The evolution of microstructure morphology, texture, distribution of Kernel Average Misorientations (KAM) and the Taylor factor in the zone of large deformations of deformed samples with different degrees of deformation is discussed. The results show that the studied steel has a good ability to compression deformation. During compression deformation, with an increase in deformation degree the deformation morphology of the ferrite grain and graphite inclusions gradually stretch in the direction perpendicular to the compression axis and they are represented as fibrous forms. The orientation of ferrite grains in the matrix is gradually obvious, and the orientation of ferrite grains around graphite inclusions is not obvious, that is, the number of grains oriented to $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ in the matrix is much greater than around graphite inclusion. In addition, KAM and the Taylor factor in the large deformations region of compression samples show that the deformation degree of ferrite grains around graphite inclusions is less than that of ferrite grains in the matrix. The reason for this is that the soft graphite inclusions can reduce the degree of dislocation pile-up.

Keywords: graphitized steel, compression deformation, microstructure, EBSD

Funding: The work was supported by Beijing Natural Science Foundation, PRC (Grant No. 2172035).

For citation: Zhang Yong-jun. EBSD analysis of graphitized steel microstructure after compression deformation at room temperature. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 230–236. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-230-236>

ВВЕДЕНИЕ

Графитизированная сталь обладает не только достаточно высокой обрабатываемостью резанием, но и хорошей деформированностью при холодной обработке давлением. Данная сталь может широко применяться в изготовлении деталей типа болтов, винтов, заклепок.

Микроструктура графитизированной стали в основном состоит из феррита и графита. Эта сталь привлекает внимание многие научно-исследовательские и производственные организации, такие как университет Лидса Великобритании [1 – 4], университет Кагосимы Японии [5, 6], металлургическую компанию Японии JFE [7, 8], университет Мешхед-филдоси и университет Асада Ирана [9 – 10], университет им. Фирдоуси в Мешхеде Ирана [11 – 12], Пекинский научно-технический университет Китая [13 – 17], Уханьскую металлургическую компанию Китая [18], Central South University Китая [19], Ляонинский научно-технический университет Китая [20] и др.

Холодная высадка – основная операция получения деталей типа болтов, винтов, заклепок. В настоящее время в литературе большое внимание уделяется процессу графитизации и обрабатываемостью резанием рассматриваемой стали, а сведений о ее способности к пластической деформации существенно меньше [6 – 8].

Цель настоящей работы – исследование микроструктуры графитизированной стали с содержанием углерода 0,43 % в процессе деформации сжатием при комнатной температуре с использованием метода дифракции обратно рассеянных электронов (*Electron Back-Scattered Diffraction* – EBSD).

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве материала исследования в данном проекте использовалась среднеуглеродистая графитизированная сталь химического состава, % (вес.): основа – Fe; 0,43 C; 1,50 Si; 0,45 Mn; 0,010 S; 0,009 P; 0,005 B; 0,013 N.

Микроструктура данной стали преимущественно состояла из феррита и включений графита (рис. 1). Видно, что включения графита распределяются не только по границам зерен, но и внутри зерен феррита. Графитовые включения имеют шаровидную форму, их размер практически одинаков, средний диаметр равен примерно 8 мкм.

В процессе исследования подготовлен исходный образец цилиндрической формы с диаметром 6,0 мм и длиной 12,0 мм. Деформацию одноосным сжатием

осуществляли на универсальной испытательной машине WDW-200D при комнатной температуре в условиях скорости обжатия 1 мм/мин. Относительная степень деформации образца составляла 30, 50 и 70 %, соответствующая истинная деформация 0,36, 0,69 и 1,2.

Образец после деформации разрезан по осевому направлению сжатия и методом электролитического полирования изготовлен металлографический шлиф. Проведено изучение микроструктуры, текстуры в зоне больших деформаций образца с различной степенью деформации с использованием методики дифракции обратно рассеянных электронов на сканирующем электронном микроскопе ZEISS-EVO18.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После деформации сжатием микро/макротрещины на поверхности и в продольном сечении образца не обнаружены. Это означает, что исследуемая сталь обладает хорошей способностью к пластической деформации сжатием.

На рис. 2 показана микроструктура в больших зонах деформаций сжатого образца при различной степени деформации с использованием оптического микроскопа. Из данного рисунка видно, что с увеличением деформации зерна феррита и включения графита вытягиваются в направлении, перпендикулярном оси сжатия, и постепенно переходят из изометрической формы в волокнистую.

На рис. 3 показаны микроструктуры в виде карты распределения ориентировок, снятые методом EBSD в больших зонах деформаций сжатого образца при

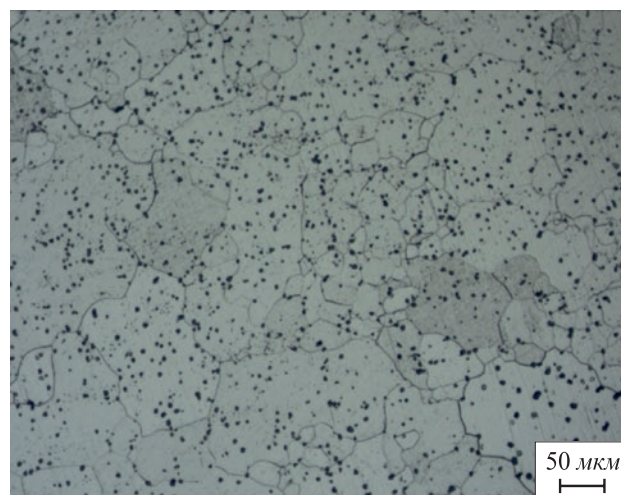


Рис. 1. Микроструктура графитированной стали

Fig. 1 Microstructure of graphitized steel

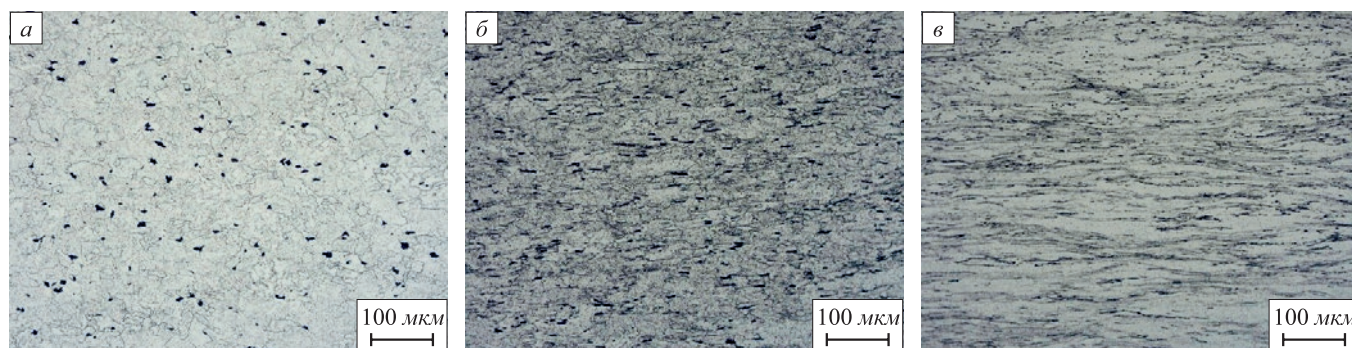


Рис. 2. Микроструктура в больших зонах деформаций сжатого образца при различной степени истинной деформации:
 а – 0,36; б – 0,69; в – 1,2

Fig. 2. Microstructure in large deformations zones of compressed sample at different deformation degrees:
 а – 0.36; б – 0.69; в – 1.2

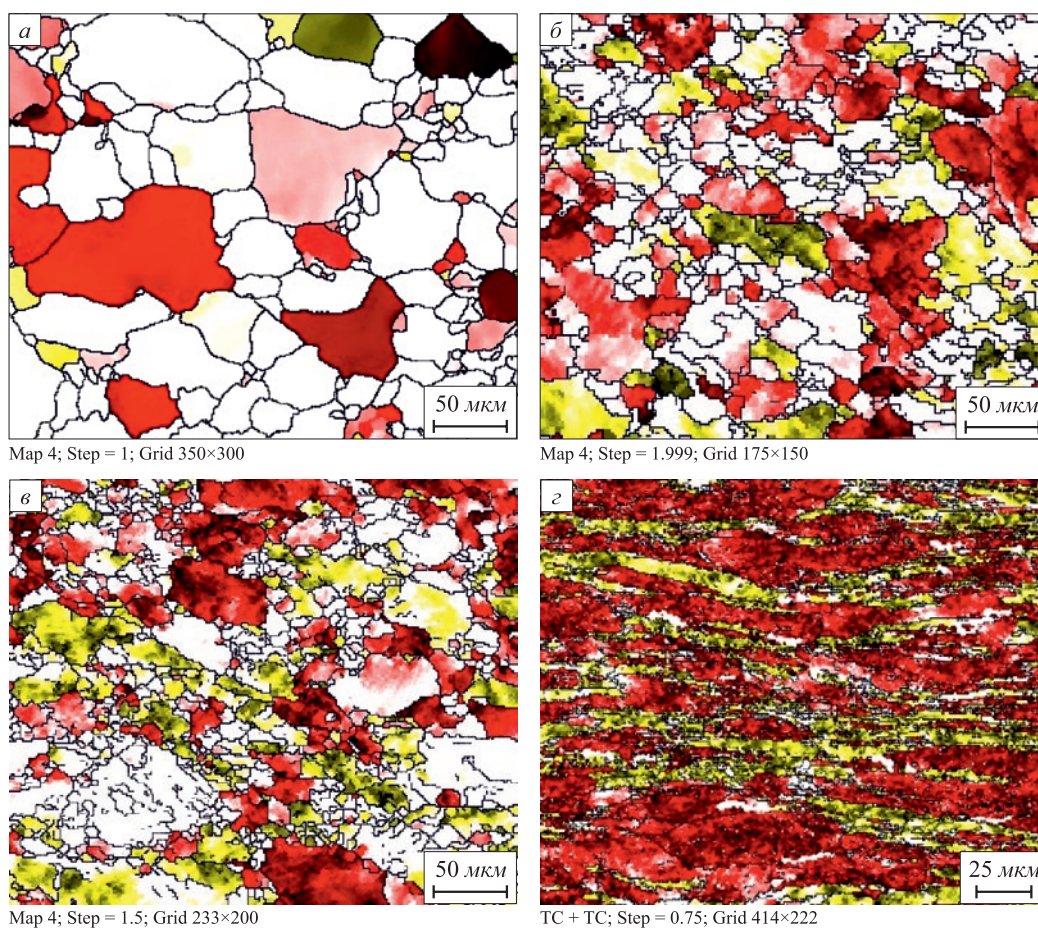


Рис. 3. Микроструктуры в больших зонах деформаций сжатого образца в виде карты распределения ориентировок, снятые методом EBSD при различной степени истинной деформации:
 а – 0; б – 0,36; в – 0,69; г – 1,2

Fig. 3. Microstructures in large deformations zones of compressed sample taken by EBSD at different deformation degrees in form of orientations distribution map:
 а – 0; б – 0.36; в – 0.69; г – 1.2

различной степени деформации. Из данного рисунка видно, что с увеличением степени деформации ориентировка зерен феррита постепенно становится очевидной, т. е. образуются в основном два кристаллографических текстурных компонента $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$ (зерна

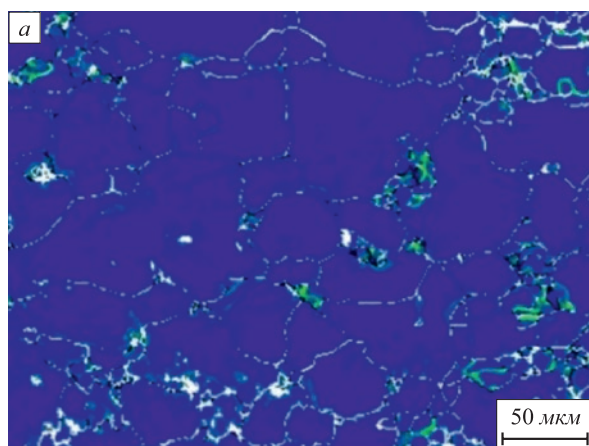
феррита с текстурным компонентом $\langle 111 \rangle$ обозначены красным цветом, а зерна феррита с текстурным компонентом $\langle 100 \rangle$ – желтым цветом). Зерен с текстурным компонентом $\langle 111 \rangle$ больше, чем зерен с текстурным компонентом $\langle 100 \rangle$.

В таблице показано, что с увеличением степени деформации происходит изменение ориентировки зерен феррита в больших зонах деформаций сжатого образца. Видно, что количество ферритных зерен, ориентированных на $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ в матрице или вокруг включений графита, увеличивается с ростом степени деформации. Однако количество зерен, ориентированных на $\langle 100 \rangle$, $\langle 111 \rangle$ в матрице, намного больше, чем вокруг включений графита. Это говорит о том, что ориентировка зерен феррита в матрице очевидна, а ориентировка зерен феррита вокруг включения графита неочевидна. Из этого следует, что в процессе деформации сжатием включения графита препятствуют вращению ферритных зерен вокруг них.

Изменение ориентировки зерен феррита в процессе деформации сжатием, %

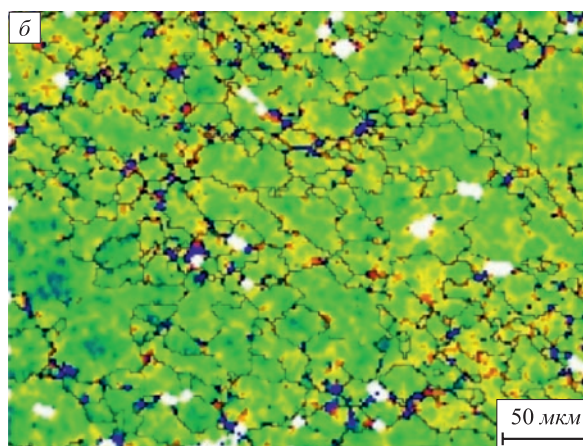
Change of ferrite grains orientation during compression deformation, %

Истинная деформация	Зерно феррита в матрице		Зерно вокруг включения графита	
	$\langle 100 \rangle$	$\langle 111 \rangle$	$\langle 100 \rangle$	$\langle 111 \rangle$
0	5,81	29,1	0,05	0,21
0,36	22,70	34,9	0,13	0,37
0,69	26,90	38,6	0,23	0,38
1,20	28,10	49,3	0,31	0,42



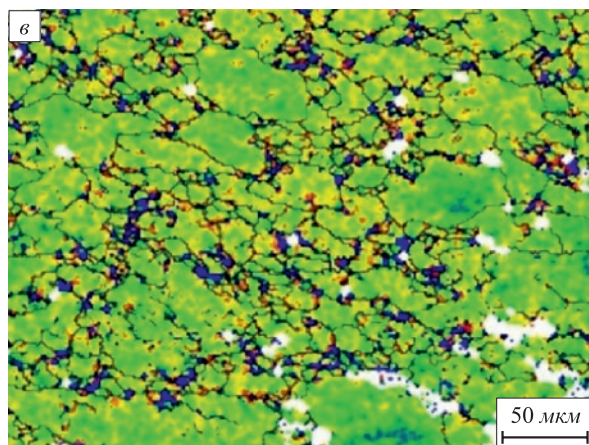
KAM; Step = 1; Grid 350×300

	0	1	2	3	4
Min	0	1	2	3	4
Max	1	2	3	4	5
Fraction	0,99	0,01	0	0	0



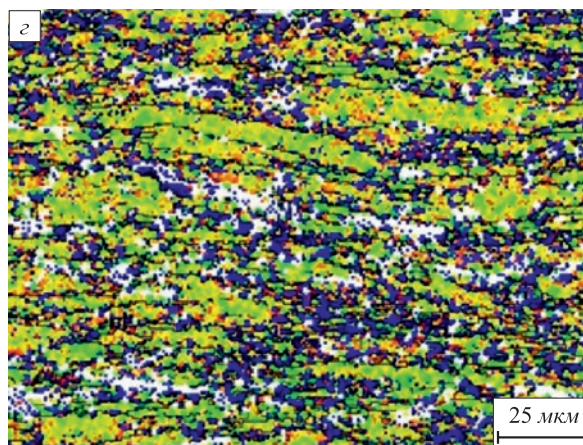
KAM; Step = 1.999; Grid 175×150

	0	1	2	3	4
Min	0	1	2	3	4
Max	1	2	3	4	5
Fraction	0,03	0,28	0,42	0,22	0,05



KAM; Step = 1.5; Grid 233×200

	0	1	2	3	4
Min	0	1	2	3	4
Max	1	2	3	4	5
Fraction	0,02	0,23	0,42	0,25	0,07



KAM; Step = 0.75; Grid 222×163

	0	1	2	3	4
Min	0	1	2	3	4
Max	1	2	3	4	5
Fraction	0,03	0,12	0,31	0,37	0,17

Рис. 4. Карты распределения средних локальных разориентировок, снятые методом EBSD при различной степени истинной деформации: а – 0; б – 0,36; в – 0,69; г – 1,2

Fig. 4. Distribution maps of Kernel Average Misorientations (KAM) taken by EBSD at different deformation degrees: а – 0; б – 0.36; в – 0.69; г – 1.2

На рис. 4 показаны карты распределения средних локальных разориентировок (*Kernel Average Misorientations* – КАМ), снятые методом EBSD в области больших деформаций сжатого образца при различных степенях деформаций. Карты распределения средних локальных разориентировок могут отражать значения плотности дислокаций в деформированном материале. На рис. 4 низкое значение КАМ обозначено синим цветом, высокое – красным. Видно, что этот показатель с увеличением степени деформации увеличивается. В процессе деформации значение КАМ ферритной матрицы, т. е. в отдалении от включений графита, больше примерно на $3 - 5^\circ$, а значение КАМ ферритной зоны вокруг включений графита меньше. Это говорит о том, что плотность дислокаций ферритной матрицы больше, чем плотность дислокаций ферритной зоны вокруг включений. Это также указывает на то, что зерна феррита вокруг включений графита менее деформированы, чем матрица феррита. Причина этого в том, что мягкие включения графита уменьшают степень скопления дислокаций.

На рис. 5 показаны карты распределения фактора Тейлора, снятые методом EBSD в области больших деформаций сжатого образца при различных степенях деформации сжатием.

Значение фактора Тейлора обозначено радужной линией (), которая слева направо указывает на рост данного показателя. Из рис. 5 видно, что площадь красной области, представляющая большое значение фактора Тейлора, растет с увеличением степени деформаций. Для ферритной матрицы и ферритных зерен вокруг включений графита количество зерен феррита с фактором Тейлора 3,5 или более увеличивается с ростом степени деформации (рис. 6). Однако количество ферритных зерен вокруг включений графита с фактором Тейлора 3,5 или более меньше, чем количество ферритных зерен матрицы. Это указывает на то, что ферриты вокруг включений графита имеют меньшую степень наклепывания, чем ферриты матрицы, т. е. ферриты вокруг включений графита имеют меньшую степень деформации, чем зерна феррита матрицы.

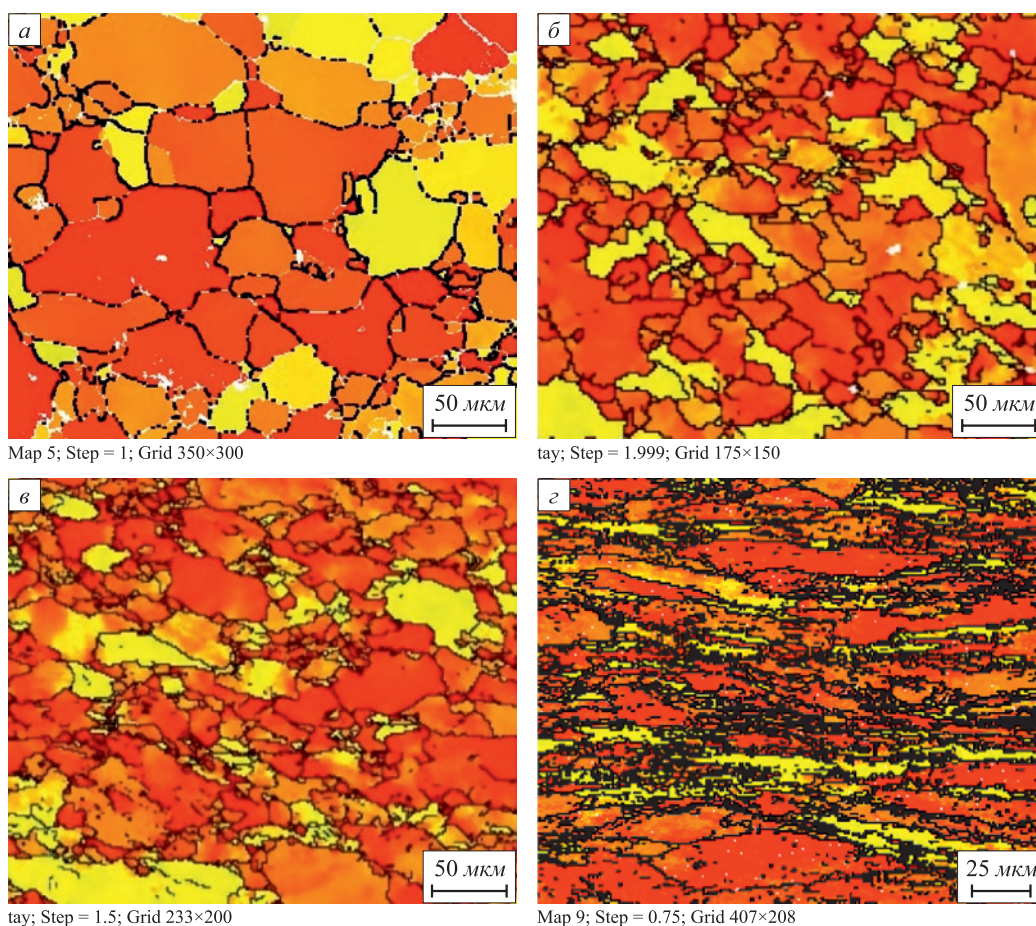


Рис. 5. Диаграммы изменения фактора Тейлора, снятые методом EBSD в больших зонах деформаций сжатого образца при различной степени истинной деформации:

$a - 0$; $b - 0,36$; $v - 0,69$; $z - 1,2$

Fig. 5. Diagrams of changes in the Taylor factor at large deformations zones of compressed sample taken by EBSD at different deformation degrees:

$a - 0$; $b - 0.36$; $v - 0.69$; $z - 1.2$

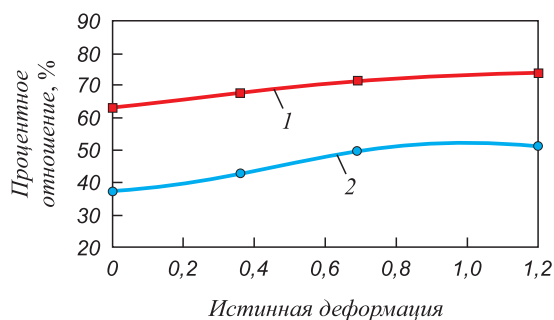


Рис. 6. Изменение количества ферритных зерен с фактором Тейлора 3,5 или более в зависимости от степени деформации:

1 – матрица феррита; 2 – феррит вокруг включений графита

Fig. 6. Changes in the number of ferrite grains with a Taylor factor of 3.5 or more with the deformation degree:

1 – ferrite matrix; 2 – ferrite around graphite inclusions

Выводы

В процессе деформации сжатием исследованной стали с увеличением степени деформации зерна феррита в зоне большого деформирования образцов постепенно переходят из изометрической формы в волокнистую.

С увеличением степени деформации ориентировка зерен феррита в матрице очевидна, а ориентировка зерен феррита вокруг включений графита неочевидна.

Средняя локальная разориентировка и коэффициент Тейлора в области больших деформаций сжатого образца показывают, что степень деформации ферритных зерен вокруг включений графита меньше, чем зерен феррита в матрице. Причина этого сводится к тому, что мягкие включения графита уменьшают степень скопления дислокаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Inam A., He K., Edmonds D. Graphitisation: A potential new route to free-machining steels // *HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 and Offshore Engineering Steels 2015*. Springer, Cham, 2016. P. 817–822. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48767-0_101
- Inam A., Brydson R., Edmonds D.V. Effect of starting microstructure upon the nucleation sites and distribution of graphite particles during a graphitising anneal of an experimental medium-carbon machining steel // *Materials Characterization*. 2015. Vol. 106. P. 86–92. <http://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.05.014>
- He K., Daniels H.R., Brown A., Brydson R., Edmonds D.V. An electron microscopic study of spheroidal graphite nodules formed in a medium-carbon steel by annealing // *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55. No. 9. P. 291–2927. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.12.029>
- He K., Brown A., Brydson R., Edmonds D. Analytical electron microscope study of the dissolution of the Fe_3C iron carbide phase (cementite) during a graphitisation anneal of carbon steel // *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 41. No. 16. P. 5235–5241. <http://doi.org/10.1007/s10853-006-0588-4>
- Sueyoshi H., Ohshige T., Suenaga K., Tanaka R. Machinability of hypo-eutectoid graphitic steels // *Journal of the Japan Institute of Metals*. 1988. Vol. 52. No. 12. P. 1285–1292. http://doi.org/10.2320/jinstmet1952.52.12_1285
- Sueyoshi H., Suenaga K., Tanaka R. Cold forgeability and machinability after cold forging of hypo-eutectoid graphitic steels // *Journal of the Japan Institute of Metals*. 1989. Vol. 53. No. 2. P. 206–211. http://doi.org/10.2320/jinstmet1952.53.2_206
- Iwamoto T., Hoshino T. Bar and wire steels for gears and valves of automobiles – Eco-friendly free cutting steel without lead addition // *JFE Technical Report*. 2004. No. 4. P. 74–80.
- Hoshino T., Matsuzaki A., Amano K., Kawaberi M. A newly developed unleaded free cutting steel which has both of high fatigue strength and excellent machinability using graphitization of carbon in the steel // *Materia Japan*. 2003. Vol. 42. No. 2. P. 163–165. <https://doi.org/10.2320/materia.42.163>
- Mokhtari A., Rashidi A.M. The transformation of CK45 steel to the dual phase graphite steel and the study of its microstructure // *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*. 2015. Vol. 5. No. S2. P. 1749–1753.
- Rounaghi S.A., Kiani-Rashid A.R. A study on graphitisation acceleration during annealing of martensitic hypereutectoid steel // *Phase Transitions*. 2011. Vol. 84. No. 11–12. P. 981–991. <http://doi.org/10.1080/01411594.2011.563153>
- Rounaghi S.A., Kiani-Rashid A.R. The effect of quenching media and annealing temperature on graphitization transformation kinetic of CK100 tool steel // *International Journal of Iron and Steel Society of Iran*. 2011. Vol. 8. No. 1. P. 34–38.
- Inam A., He K., Edmonds D. Graphitisation: A potential new route to free-machining steels. *HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 and Offshore Engineering Steels 2015*. Springer, Cham, 2016, pp. 817–822. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48767-0_101
- Inam A., Brydson R., Edmonds D.V. Effect of starting microstructure upon the nucleation sites and distribution of graphite particles during a graphitising anneal of an experimental medium-carbon machining steel. *Materials Characterization*. 2015, vol. 106, pp. 86–92. <http://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.05.014>
- He K., Daniels H.R., Brown A., Brydson R., Edmonds D.V. An electron microscopic study of spheroidal graphite nodules formed in a medium-carbon steel by annealing. *Acta Materialia*. 2007, vol. 55, no. 9, pp. 291–2927. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2006.12.029>
- He K., Brown A., Brydson R., Edmonds D. Analytical electron microscope study of the dissolution of the Fe_3C iron carbide phase (cementite) during a graphitisation anneal of carbon steel. *Journal of Materials Science*. 2006, vol. 41, no. 16, pp. 5235–5241. <http://doi.org/10.1007/s10853-006-0588-4>
- Sueyoshi H., Ohshige T., Suenaga K., Tanaka R. Machinability of hypo-eutectoid graphitic steels. *Journal of the Japan Institute of Metals*. 1988, vol. 52, no. 12, pp. 1285–1292. http://doi.org/10.2320/jinstmet1952.52.12_1285
- Sueyoshi H., Suenaga K., Tanaka R. Cold forgeability and machinability after cold forging of hypo-eutectoid graphitic steels. *Journal of the Japan Institute of Metals*. 1989, vol. 53, no. 2, pp. 206–211. http://doi.org/10.2320/jinstmet1952.53.2_206
- Iwamoto T., Hoshino T. Bar and wire steels for gears and valves of automobiles – Eco-friendly free cutting steel without lead addition. *JFE Technical Report*. 2004, no. 4, pp. 74–80.
- Hoshino T., Matsuzaki A., Amano K., Kawaberi M. A newly developed unleaded free cutting steel which has both of high fatigue strength and excellent machinability using graphitization of carbon in the steel. *Materia Japan*. 2003, vol. 42, no. 2, pp. 163–165. (In Japanese). <https://doi.org/10.2320/materia.42.163>
- Mokhtari A., Rashidi A.M. The transformation of CK45 steel to the dual phase graphite steel and the study of its microstructure. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*. 2015, vol. 5, no. S2, pp. 1749–1753.
- Rounaghi S.A., Kiani-Rashid A.R. A study on graphitisation acceleration during annealing of martensitic hypereutectoid steel. *Phase Transitions*. 2011, vol. 84, no. 11–12, pp. 981–991. <http://doi.org/10.1080/01411594.2011.563153>
- Rounaghi S.A., Kiani-Rashid A.R. The effect of quenching media and annealing temperature on graphitization transformation kinetic of CK100 tool steel. *International Journal of Iron and Steel Society of Iran*. 2011, vol. 8, no. 1, pp. 34–38.

12. Kiani-Rashid A.R., Bozchalooi G.I., Azzat-pour H.R. The influence of annealing temperature on the graphitisation of CK 45 Steel // *Journal of Alloys and Compounds*. 2009. Vol. 475. No. 1-2. P. 822–826. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.08.024>
13. Zhang Y.-J., Han J.-T., Wang Q.-L., Zhu C., Jin Y.-C. Research and development of graphitized hypoeutectoid free cutting steel // *Iron and Steel (Peking)*. 2008. Vol. 43. No. 8. P. 73–76.
14. Zhang Y.-J., Han J.-T., Wang Q.-L., etc. Microstructure and properties of medium-carbon steel with graphite // *Materials for Mechanical Engineering*. 2008. Vol. 32. No. 10. P. 48–51.
15. Zhang Y.-J., Han J.-T., Wang Q.-L., Zhu C., Jin Y.-C. Graphitization process of medium-carbon steel // *Materials Science and Technology*. 2009. Vol. 17. No. 6. P. 750–753.
16. Zhang Y., Han J., Wang H. Graphitization kinetic of hypoeutectoid graphitized free cutting steel // *Applied Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 143-144. P. 508–510. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.143-144.508>
17. Zhang Y.-J., Han J. Hot deformation resistance of graphitized free cutting steel // *Journal of Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 33. No. 1. P. 13–16.
18. Yin Y.-Y., Fang F., Yan X., Zhu C.-M., Chen W., Luo G.-H., Guan J.-S. Microstructure and properties of environmental graphitized free-cutting steel // *Transactions of Materials and Heat Treatment*. 2013. Vol. 34. No. 4. P. 133–137.
19. Gao J.X., Wei B.Q., Li D.D., He K. Nucleation and growth characteristics of graphite spheroids in bainite during graphitization annealing of a medium carbon steel // *Materials Characterization*. 2016. Vol. 118. P. 1–8. <http://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.05.003>
20. Zhang Zheng, Li Ruiwu, Ma Kexin, etc. Effect of medium temperature deformation on graphitization of 45 steel // *Journal of University of Science and Technology Liaoning*. 2018. Vol. 41. No. 5. P. 351–356.
12. Kiani-Rashid A.R., Bozchalooi G.I., Azzat-pour H.R. The influence of annealing temperature on the graphitisation of CK 45 steel. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009, vol. 475, no. 1-2, pp. 822–826. <http://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.08.024>
13. Zhang Y.-J., Han J.-T., Wang Q.-L., Zhu C., Jin Y.-C. Research and development of graphitized hypoeutectoid free cutting steel. *Iron and Steel (Peking)*. 2008, vol. 43, no. 8, pp. 73–76.
14. Zhang Y.-J., Han J.-T., Wang Q.-L., etc. Microstructure and properties of medium-carbon steel with graphite. *Materials for Mechanical Engineering*. 2008, vol. 32, no. 10, pp. 48–51.
15. Zhang Y.-J., Han J.-T., Wang Q.-L., Zhu C., Jin Y.-C. Graphitization process of medium-carbon steel. *Materials Science and Technology*. 2009, vol. 17, no. 6, pp. 750–753.
16. Zhang Y., Han J., Wang H. Graphitization kinetic of hypoeutectoid graphitized free cutting steel. *Applied Mechanics and Materials*. 2011, vol. 143-144, pp. 508–510. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.143-144.508>
17. Zhang Y.-J., Han J. Hot deformation resistance of graphitized free-cutting steel. *Journal of Materials Science and Engineering*. 2015, vol. 33, no. 1, pp. 13–16. (In Chinese).
18. Yin Y.-Y., Fang F., Yan X., Zhu C.-M., Chen W., Luo G.-H., Guan J.-S. Microstructure and properties of environmental graphitized free-cutting steel. *Transactions of Materials and Heat Treatment*. 2013, vol. 34, no. 4, pp. 133–137.
19. Gao J.X., Wei B.Q., Li D.D., He K. Nucleation and growth characteristics of graphite spheroids in bainite during graphitization annealing of a medium carbon steel. *Materials Characterization*. 2016, vol. 118, pp. 1–8. <http://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.05.003>
20. Zhang Zheng, Li Ruiwu, Ma Kexin, etc. Effect of medium temperature deformation on graphitization of 45 steel. *Journal of University of Science and Technology Liaoning*. 2018, vol. 41, no. 5, pp. 351–356.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Чжан Юн-Цзюнь, PhD, доцент Института материаловедения и инженерии, Пекинский научно-технический университет
E-mail: zhangyj@mater.ustb.edu.cn

Zhang Yong-Jun, PhD, Assist. Prof. of School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing
E-mail: zhangyj@mater.ustb.edu.cn

Поступила в редакцию 12.03.2020
 После доработки 16.01.2021
 Принята к публикации 01.03.2021

Received 12.03.2020
 Revised 16.01.2021
 Accepted 01.03.2021