УДК 669 72

Алена Алексеевна Казакова*[1]
[1]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", г. Москва, Россия
**kazakova.aa@misis.ru,*

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ЭВОЛЮЦИИ СТРУКТУРЫ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ И ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ FE-30MN-10AL-1C-3SI С ПОВЫШЕННОЙ УДЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТЬЮ

Работа посвящена изучению влияния термической обработки и горячей деформации на микроструктуру и механические свойства стали Fe-30Mn-10Al-1C-3Si, а также исследованию структурообразования при горячей пластической деформации. Проведена термическая обработка и испытания на высокотемпературное сжатие, в результате были построены математические модели эволюции микроструктуры в процессе горячей деформации.

Ключевые слова: высокая удельная прочность, горячая деформация, микроструктура.

Alena A. Kazakova

STUDYING THE MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE EVOLUTION DURING HEAT TREATMENT AND HOT DEFORMATION OF FE-30MN-10AL-1C-3SI STEEL WITH INCREASED SPECIFIC STRENGTH

The work is devoted to the study of heat treatment and hot deformation influence on the microstructure and mechanical properties of Fe-30Mn-10Al-1C-3Si steel, as well as to the study structure formation during hot plastic deformation. Heat treatments and high-temperature compression tests were carried out, as a result, coefficients for mathematical models of microstructure evolution during hot deformation were calculated.

Keywords: high specific strength, hot deformation, microstructure.

Повышение удельной прочности материалов является актуальной проблемой, так-как появляется возможность значительно снизить вес конструкции. Исследования показали, что сталь Fe-30Mn-10Al-1C после закалки обладает высокой пластичностью (50-70%), однако предел прочности оказался невысок (600-700 МПа) [1–3]. Значительно повысить прочность позволяет старение с образованием κ-фазы, а легирование Si ускоряет кинетику образования κ-фазы, поэтому объектом исследования была выбрана сталь Fe-30Mn-10Al-1C-3Si.

Слитки стали были получены методом индукционной плавки в атмосфере аргона в лабораторных и полупромышленных условиях из шихтовых материалов технической чистоты. В литом состоянии в стали

© Казакова А.А.

присутствовали аустенит и феррит, однако в полупромышленной стали также присутствовали к-фаза и упорядоченные в феррите B2 и $D0_3$ фазы, появление которых связано, вероятно, с сильной ликвацией и низкой скоростью охлаждения.

При отжиге 1100 °С длительностью 1 час лабораторных образцов происходит распад аустенита, в структуре появляется к-фаза. Отжиг полупромышленных образцов при 1000 °С привел к коагуляции к-фазы и разупорядочению B2 и $D0_3$ фаз. Для исследования влияния термообработки на микроструктуру и механические свойства стали была использована полученная в полупромышленных условиях сталь. Согласно EBSD анализу после закалки в структуре присутствует 54% аустенита, старение при 600 °С 30 минут приводит к уменьшению содержания аустенита до 35%, при этом значительно увеличивается доля феррита.

Микроструктура сталей в горячедеформированном при температурах 900–1100 °С и скоростях деформации 0,1–10 $с^{-1}$ состоянии была исследована и построены зависимости размера динамически рекристаллизованного зерна от параметра Зинера-Холломона. Построенные зависимости с нанесенными экспериментальными точками представлены на рисунке 1. Средний размер динамически рекристаллизованного зерна стали, полученной в полупромышленных условиях больше, чем значение для стали, полученной в лабораторных условиях, что связано с более крупной исходной структурой.

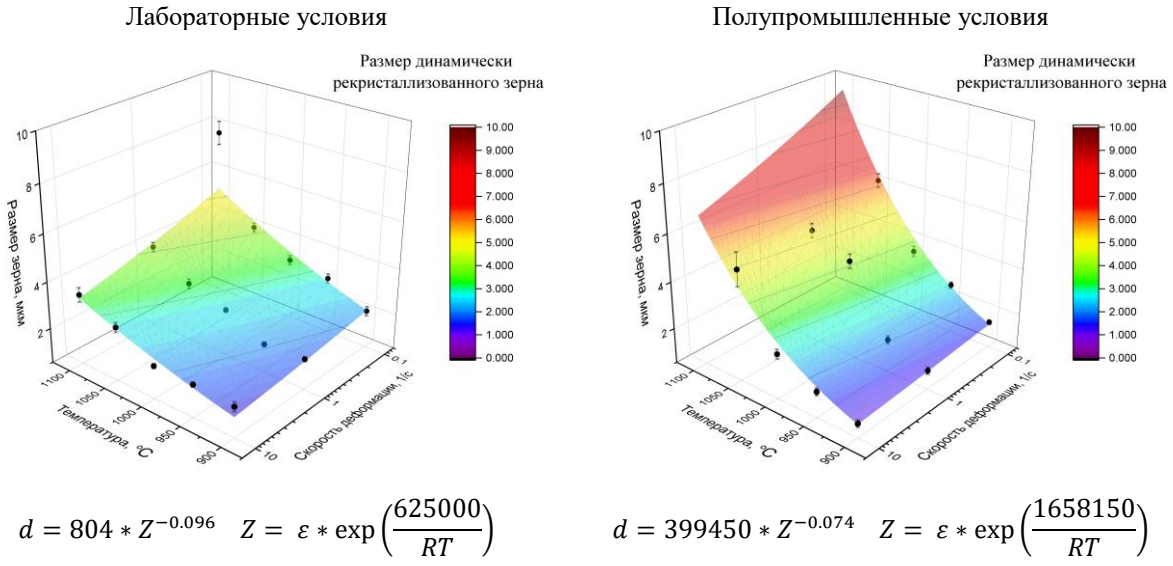
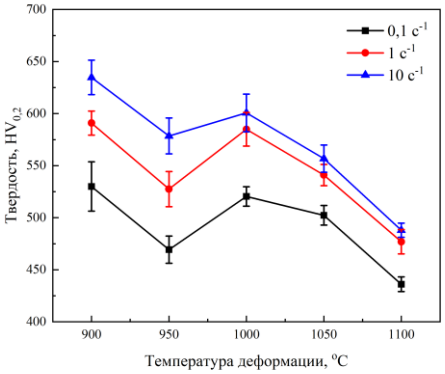


Рис. 1. Зависимость размера динамически рекристаллизованного зерна от параметров горячей деформации

Зависимость твердости стали от температуры и скорости деформации представлены на рисунке 2. Вследствие большей скорости динамического наклепа, с увеличением скорости деформации твердость повышается, однако повышение твердости с уменьшением температуры происходит немонотонно: при температуре 950 °С наблюдается значительное снижение, связанное с особенностями деформационного поведения феррита и аустенита.

Лабораторные условия



Полупромышленные условия

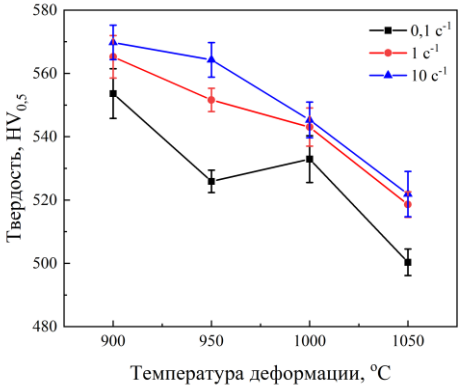


Рис. 2. Зависимость твердости от параметров горячей деформации

Для объяснения данного явления предложена схема, представленная на рисунке 3, аустенит обозначен синим, феррит желтым. Снижение твердости после деформации 950 °С связано с ускоренным протеканием динамического возврата в феррите, а дальнейшее повышение при температуре 1000 °С связано с уменьшением объемной доли феррита.

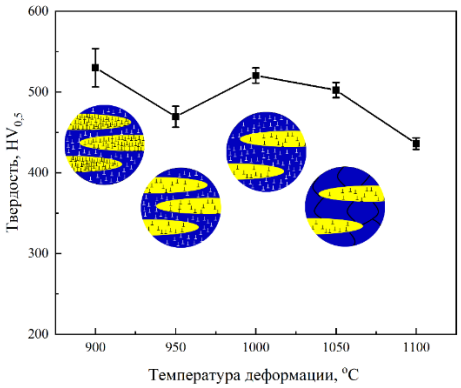


Рис. 3. Зависимость микроструктуры и твердости от температуры горячей деформации

Для исследования механических свойств стали после термической и термодеформационной обработок использовалась сталь, полученная в полупромышленных условиях (таблица). Заметно, что закалка повысила твердость, но значительно снизила прочность и пластичность стали из-за термических напряжений. Дальнейшее старение привело к повышению твердости, прочности и пластичности.

Значительно повысить механические свойства стали позволила горячая деформация, при этом наибольшее влияние оказала скорость деформации. Значения предела текучести и пластичности повторили закономерность твердости: образцы, деформированные при температуре 950 °С пластичнее и их предел текучести ниже, чем у деформированных при 1000 °С.

Таблица

Механические свойства стали, полученной в полупромышленных условиях

Состояние	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Укорочение до разрушения	Удельная прочность, $\sigma_{0.2}/\rho$, 10^3 м^2/с^2	HV0.5
Механические свойства после термообработки					
Литое состояние	1350	1960	8	209	508 ± 3
Закалка	1240	1620	5	191	530 ± 16
Старение	1310	1810	8	202	550 ± 17
Механические свойства после горячей деформации					
1000 °C – 0.1 c^{-1}	1450	1880	13	224	532±12
1000 °C – 1 c^{-1}	1510	2100	13	233	543±10
950 °C – 0.1 c^{-1}	1400	2060	16	216	526±8

Удельная прочность стали Fe-30Mn-10Al-1C-3Si составила 216 000–233 000 м^2/с^2, что на 50 % больше, чем у разработанных к настоящему времени высокопрочных сталей, применяемых в автомобилестроении (рисунок 4).

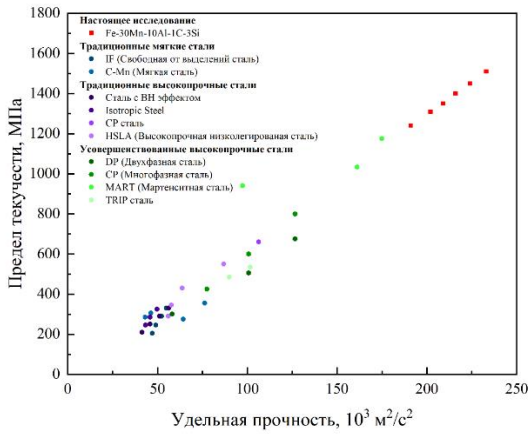


Рис. 4. Сопоставление механических свойств стали Fe-30Mn-10Al-1C-3Si с существующими аналогами

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chao C., Liu C. Effects of Mn Contents on the Microstructure and Mechanical Properties of the Fe – 10Al – x Mn – 1 . 0C Alloy // 2002. – V. 43. – Pp. 2635–2642.
2. Wang H., Wang C., Liang J., Godfrey A., Wang Y., Weng Y., Cao W. Materials Science & Engineering A Effect of alloying content on microstructure and mechanical properties of Fe – Mn – Al – C low-density steels // Materials Science & Engineering A. – 2023. – V. 886. – Pp. 145675.

3. Ma L., Tang Z., You Z., Guan G., Ding H., Misra D. Microstructure, Mechanical Properties and Deformation Behavior of Fe-28.7Mn-10.2Al-1.06C High Specific Strength Steel // Metals. – 2022. – V. 12.

REFERENCES

1. Chao C., Liu C. Effects of Mn Contents on the Microstructure and Mechanical Properties of the Fe – 10Al – x Mn – 1 . 0C Alloy // 2002. – V. 43. – Pp. 2635–2642.
2. Wang H., Wang C., Liang J., Godfrey A., Wang Y., Weng Y., Cao W. Materials Science & Engineering A Effect of alloying content on microstructure and mechanical properties of Fe – Mn – Al – C low-density steels // Materials Science & Engineering A. – 2023. – V. 886. – Pp. 145675.
3. Ma L., Tang Z., You Z., Guan G., Ding H., Misra D. Microstructure, Mechanical Properties and Deformation Behavior of Fe-28.7Mn-10.2Al-1.06C High Specific Strength Steel // Metals. – 2022. – V. 12.