

УДК 621.745.55

Ямшинский М. М., Федоров Г. Е., Платонов Е. А., Кузьменко А. Е.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТЫХ ХРОМОАЛЮМИНИЕВЫХ СТАЛЕЙ

Жаростойкие сплавы, которые используют для изготовления литых деталей топливосжигающих систем тепловых электростанций, оборудования металлургических, химических и машиностроительных предприятий, имеют существенные недостатки: содержат в своем составе дорогие и дефицитные элементы (никель, кобальт, молибден и др.), малотехнологичны как литейный материал и далеко не всегда отвечают предъявляемым к ним требованиям относительно механических и эксплуатационных характеристик [1–4].

Учитывая технологические, эксплуатационные и экономические аспекты, такие сплавы, как показывает практика их использования, должны иметь высокие температуры плавления и окислительную стойкость, удовлетворительные литейные и механические свойства и должны быть недорогими и недефицитными.

Механические и эксплуатационные свойства сплавов определяются, прежде всего, их структурой, которая зависит от многих факторов: химического состава сплава, технологических особенностей плавления, температурных режимов разлива и охлаждения металла в литейной форме.

Следовательно, все механические свойства есть структурочувствительными, т. е. в полной мере зависят от размеров зерен, межзеренных связей, неметаллических включений и др.

Наилучший комплекс механических и эксплуатационных свойств имеют стали с однородной, максимально гомогенной структурой.

Известно [1], что стали, содержащие значительное количество легирующих элементов (прежде всего, хрома, алюминия, кремния и др.), имеют крупнозернистую ферритную структуру, которую нельзя изменить никакими режимами термической обработки. Улучшить свойства таких сталей можно только дополнительной обработкой их, например, карбидо- или нитридообразующими элементами, а также элементами, способствующими дисперсионному твердению металла [2–3].

Измельчения первичного зерна можно добиться и технологическими приемами.

Среди химических элементов наиболее дешевым является титан, а из технологических приемов наиболее эффективными могут быть последовательность ввода в расплав легирующих элементов и температурные режимы плавки, разлива и охлаждения металла.

Целью статьи является разработка новых высокоэффективных жаростойких сплавов для работы в агрессивных средах до 1250 °С с учетом их структуры и свойств. Для этого поставлены такие задачи:

- исследовать влияние структуры металла на механические свойства жаростойких сталей в широком диапазоне концентраций хрома, алюминия;
- оптимизировать концентрации этих элементов, которые обеспечили бы наилучший комплекс технологических и механических характеристик;
- изучить влияние редкоземельных металлов (РЗМ) на структуру хромоалюминиевых сталей и установить целесообразность дополнительной обработки ими жаростойких сплавов.

Исследовано влияние основных легирующих элементов на структуру и свойства жаростойких сталей в таких диапазонах концентраций: хром – 13...37 %; алюминий – до 7 %.

Установлено, что повышение содержания хрома и алюминия в исследованных сталях сопровождается снижением их плотности, поскольку хром и алюминий имеют меньшую плотность в сравнении с железом. Изменение плотности жаростойких сталей в зависимости

от содержания хрома и алюминия показана на рис. 1 (содержание хрома взято среднее для каждой группы). Так плотность сталей с 13 % хрома составляет $7,72 \text{ г/см}^3$, а с 7,1 % алюминия – $6,72 \text{ г/см}^3$.

Плотность металла существенно влияет на прочностные характеристики изделий в условиях высоких температур, особенно, когда литые детали работают в консольном режиме. Поэтому уменьшение плотности способствует снижению степени деформационных процессов в таких изделиях во время их эксплуатации.

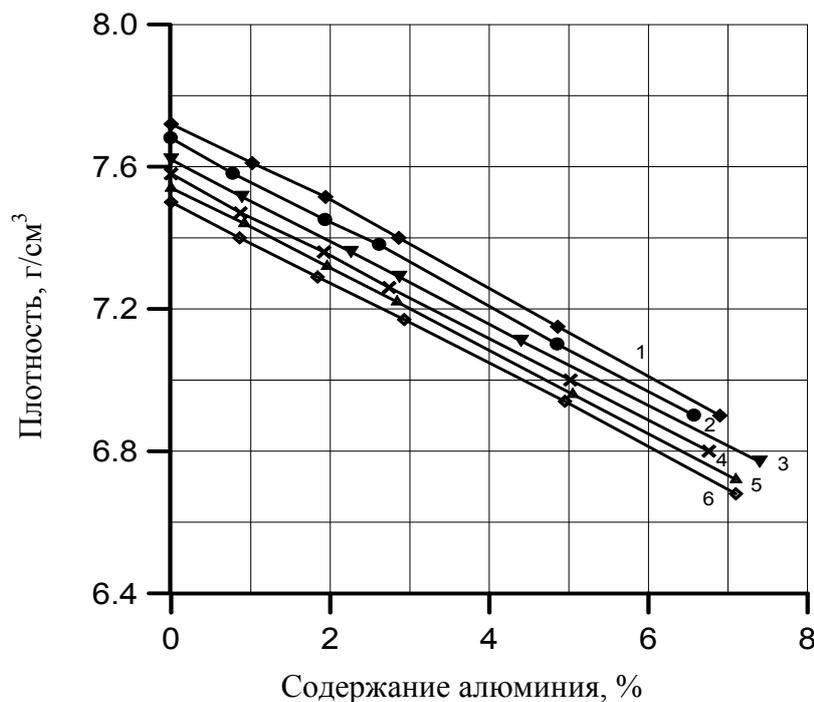


Рис. 1. Влияние хрома и алюминия на плотность жаростойких сталей:
1 – 13 % Cr; 2 – 17 % Cr; 3 – 22 % Cr; 4 – 25 % Cr; 5 – 29 % Cr; 6 – 35 % Cr

Увеличение концентрации хрома в жаростойких сталях изменяет их структуру от мартенситно-ферритной до ферритной с небольшим количеством мелких карбидов (см. рис. 2).

Структура стали с 13,8 % хрома состоит с легированного хромом феррита, продуктов распада аустенита и специальных карбидов хрома, которые располагаются на границах зерен (рис. 2, а). Такая сталь имеет наивысшие прочностные характеристики, например, временное сопротивление разрыву достигает 485 МПа, (рис. 3).

Увеличение концентрации хрома выше 13 % изменяет структуру стали от полуферритной (см. рис. 2, б) до ферритной (см. рис. 2, д), при этом наблюдается некоторый рост размеров зерна – с 87 до 120 мкм вследствие уменьшения теплопроводности металла во время кристаллизации и снижение временного сопротивления разрыву до 324 МПа (см. рис. 3).

Однако повышение содержания хрома в стали до 37 % увеличивает количество крупных карбидов остроугольной формы, которые являются концентраторами напряжений (рис. 4, а) и вероятность их коагуляции (рис. 4, б), а также количество вредных примесей (рис. 4, в), которые располагаются преимущественно по границам зерен и ослабляют межзеренные связи. При этом создается условие образования σ -фазы, которая представляет собой хрупкое интерметаллидное соединение FeCr. Это приводит к снижению прочности до 262 МПа (см. рис. 3) и ударной вязкости до $0,067 \text{ МДж/м}^2$ (рис. 5).

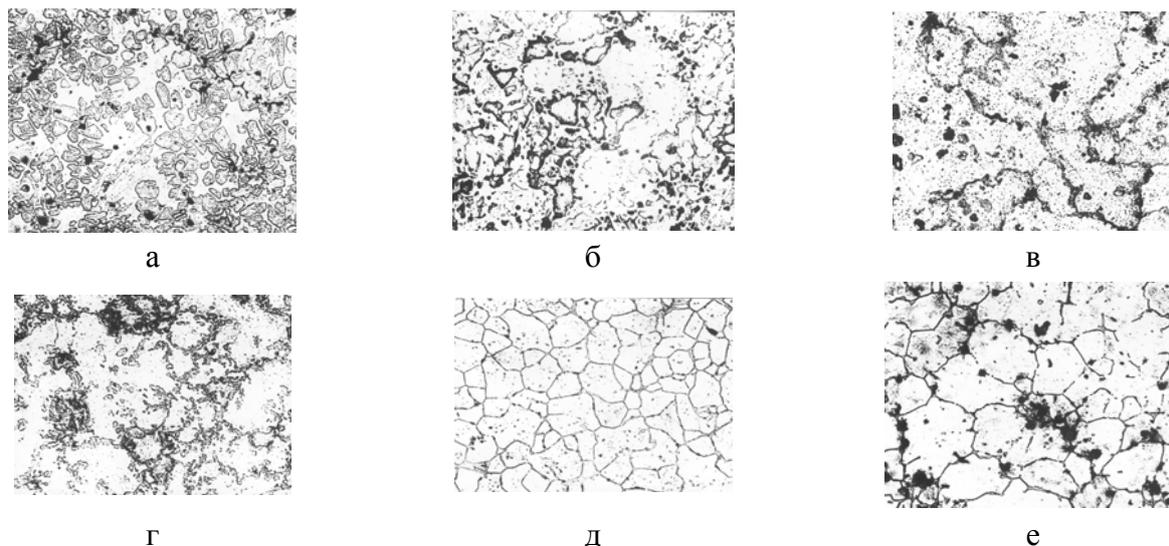


Рис. 2. Микроструктури жаростойких сталей (0,35 % С, 1,84 % Al) с различным содержанием хрома ($\times 100$):

а – 13,8 % Cr; б – 18,5 % Cr; в – 22,3 % Cr; г – 24,6 % Cr; д – 30,7 % Cr; е – 37,0 % Cr

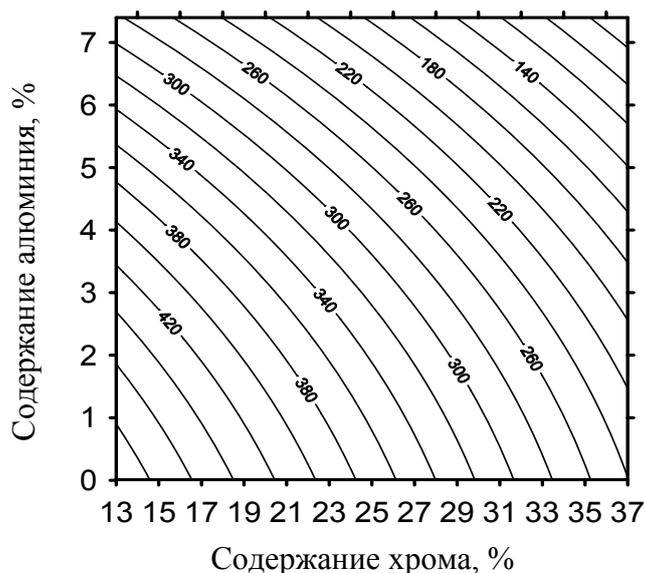


Рис. 3. Временное сопротивление разрыву сталей в зависимости от содержания в них хрома и алюминия

Изменение содержания в жаростойких сталях хрома и алюминия существенно влияет на их твердость.

Стали с 13...14 % хрома и 0,3...0,4 % углерода относят к мартенситному классу. Во время кристаллизации этих сталей на границах зерен собираются скопления крупных карбидов (см. рис. 4, а, б), которые придают сталям высокую твердость. Кроме этого, стали мартенситного класса склонны к самозакаливанию при охлаждении, что значительно повышает их твердость (рис. 6).

Стали с 17...18 % хрома относят к полуферритному классу. При содержании в них 0,3...0,4 % углерода они склонны к коагуляции карбидов и имеют высокую твердость. С повышением в стали содержания хрома, повышается количество ферритной составляющей структуры, что приводит к снижению твердости металла.

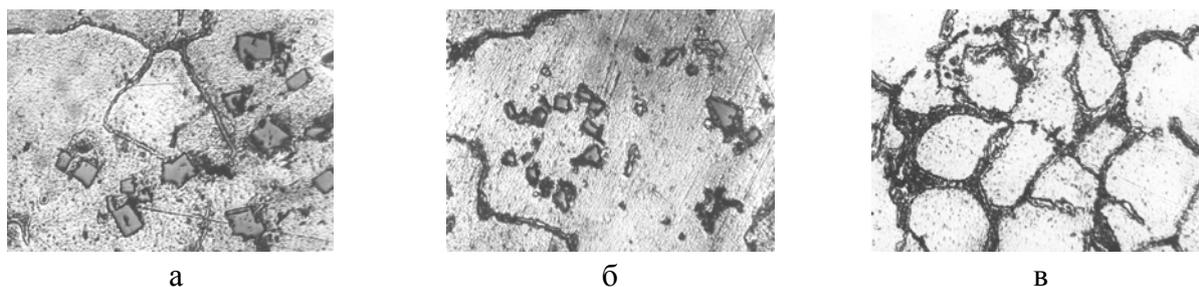


Рис. 4. Крупные карбиды в хромоалюминиевой стали, их колонии и неметаллические включения, × 600

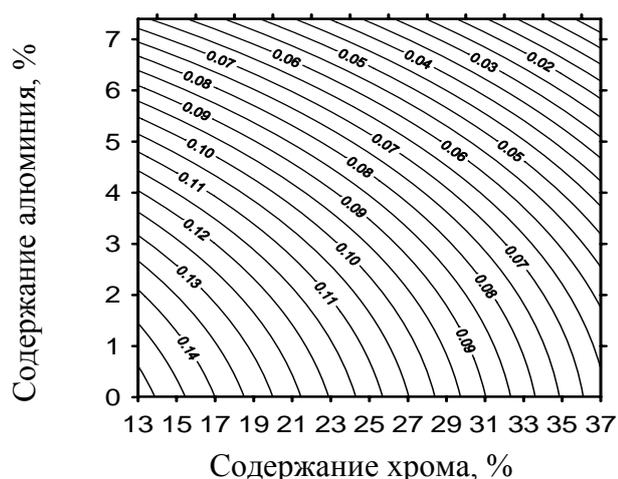


Рис. 5. Ударная вязкость жаростойких сталей в зависимости от содержания в них хрома и алюминия

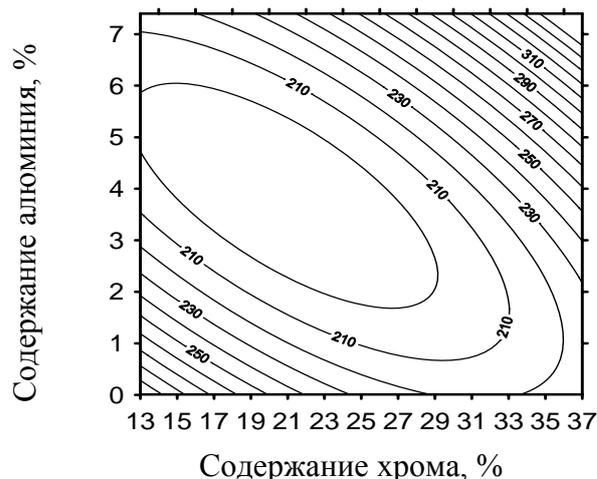


Рис. 6. Твердость жаростойких сталей в зависимости от содержания в них хрома и алюминия

Следовательно, лучший комплекс механических свойств имеет среднеуглеродистая жаростойкая хромистая сталь с содержанием 28...32 % Cr. Известно, что добавки в стали небольших количеств (0,1...0,2 %) алюминия существенно повышают механические свойства вследствие высокой его раскислительной способности, образования тугоплавких мелкодисперсных соединений (оксидов, нитридов), которые служат дополнительными центрами кристаллизации и измельчают структуру металла во время первичной кристаллизации, улучшая его механические свойства.

Алюминий в больших количествах существенно изменяет структуру (рис. 7) и свойства хромистых сталей. Так, при содержании в стали около 1 % алюминия, она становится максимально равнозернистой с небольшим количеством карбидов, которые располагаются преимущественно на границах зерен (см. рис. 7, б). Временное сопротивление разрыву при этом возрастает до 324 МПа (см. рис. 3).

Алюминий в сталях существенно снижает теплопроводность металла, поэтому увеличение его содержания в сплаве до 3 % способствует росту зерен феррита с 69 до 87 мкм и неметаллических включений (см. рис. 7, г). Временное сопротивление разрыву при этом уменьшается до 270 МПа (см. рис. 3).

Повышение концентрации алюминия до 7 % несколько уменьшает размеры зерна, очевидно, вследствие увеличения количества нитридов алюминия в стали и снижения растворимости углерода в твердом растворе, что способствует образованию карбидов при более высоких температурах и выделению их внутри зерен (см. рис. 7, д, е). Однако такое изменение содержания алюминия в хромистой стали способствует образованию крупных неметаллических включений, которые располагаются на границах зерен, ослабляют межкристаллитную связь

и снижают механические свойства. Временное сопротивление разрыву снижается до 161 МПа (см. рис. 3), ударная вязкость – до 0,034 МДж/м² (см. рис. 5), а твердость возрастает с 200 до 280 НВ (см. рис. 6).

Следовательно, количество алюминия в хромистой стали необходимо определять с учетом действия нагрузок на изделие во время его эксплуатации.

Вообще содержание алюминия в жаростойких сталях определяется тем минимумом, при котором сохраняется высокая жаростойкость, и тем максимумом, при котором существенно снижаются литейные и механические свойства.

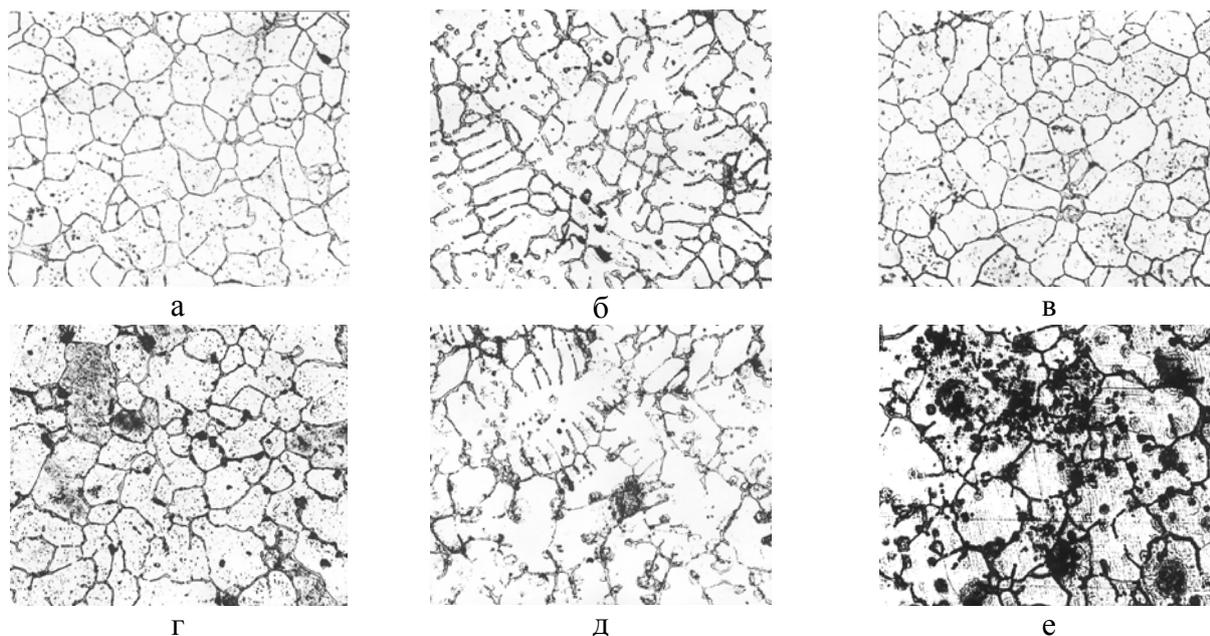


Рис. 7. Изменение структуры хромистой стали (0,35 % С; 30,7 % Сr) в зависимости от содержания в ней алюминия ($\times 100$):

а – без Al; б – 0,92 % Al; в – 1,96 % Al; г – 2,84 % Al; д – 5,05 % Al; е – 7,1 % Al

Таким образом, для достижения наилучших показателей механических характеристик стали с 28...32 % Cr содержание алюминия в ней должно находиться на уровне 1,2...2,2 %. Такое соотношение основных легирующих элементов обеспечивает наилучший комплекс литейных свойств, а вместе с ним и изготовление высококачественных жаростойких отливок с высокими механическими свойствами.

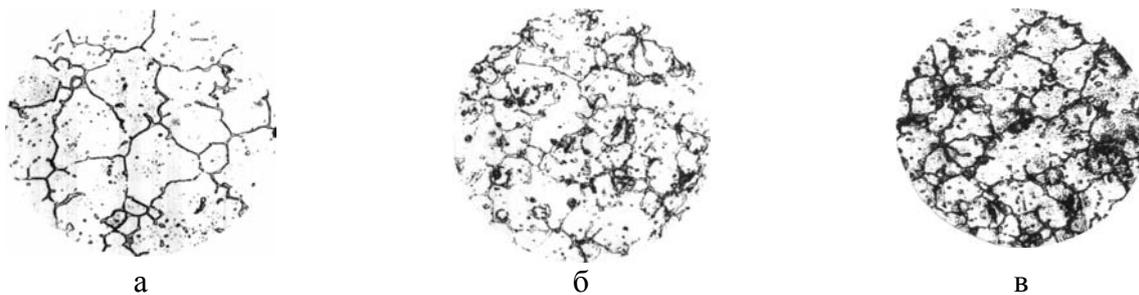
Для изготовления отливок простой конфигурации содержание алюминия может быть увеличено до 3 %.

Одним из перспективных технологических приемов для улучшения механических свойств является дополнительная обработка расплава редкоземельными металлами (РЗМ).

Установлено, что присадка до 0,3 % РЗМ в хромоалюминиевую сталь улучшает на 15...25 % механические свойства, поскольку РЗМ являются хорошими дегазаторами и десульфураторами, они изменяют минералогический состав, размеры и плотность неметаллических включений, при этом переводят их из остроугольной формы в глобулярную, рис. 8, б.

РЗМ образуют с вредными примесями несмачиваемые сталью соединения, которые быстро всплывают в шлак и снижают температуру пленообразования жидкого металла. Это значит, что пленообразование перестает отрицательно влиять как на технологические свойства стали, так и на прочностные характеристики отливок.

Повышение присадки РЗМ свыше 0,5 % способствует увеличению общего количества неметаллических примесей, которые располагаются как по границам зерен (см. рис. 8, в), так и внутри зерен в виде так называемой «цериевой пористости», рис. 9.



а

б

в

Рис. 8. Микроструктура хромоалюминиевой стали 35X30Ю2ТЛ в зависимости от присадки PЗМ ($\times 100$):

а – 0,25 % PЗМ; б – 0,5 % PЗМ; в – 1,0 % PЗМ

Следовательно, в тех случаях, когда из хромоалюминиевой жаростойкой стали изготавливают отливки ответственного и особо ответственного назначения, целесообразно расплав во время выпуска из печи дополнительно обрабатывать 0,15...0,25 % PЗМ.



Рис. 9. «Цериевая пористость» в хромоалюминиевой стали 35X30Ю2ТЛ после обработки 0,5 % PЗМ ($\times 600$)

Несмотря на дороговизну этих элементов, их использование целесообразно и с экономической стороны, поскольку они существенно улучшают литейные свойства жаростойких сталей, и, не изменяя их окалинстойкости, существенно повышает механические характеристики литых деталей.

ВЫВОДЫ

Комплексным исследованием влияния основных легирующих элементов на структуру и свойства жаростойких сталей установлено, что лучшим литейным материалом для изготовления тонкостенных крупногабаритных отливок, которые работают в условиях высоких температур и агрессивных сред, являются среднеуглеродистые хромоалюминиевые стали с 25...32 % Cr, 1,2...2,2 % Al. Для получения высококачественного расплава хромоалюминиевой стали перед выпуском из плавильного агрегата его необходимо раскислять по схеме: ферромарганец \rightarrow ферросилиций \rightarrow 0,2 % алюминия, затем вводить необходимое количество ферротитана и алюминия. Для обеспечения высоких литейных, механических и эксплуатационных характеристик хромоалюминиевую сталь целесообразно во время выпуска из плавильного агрегата обрабатывать 0,15...0,25 PЗМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудремон Э. Специальные стали. Т. 1. / Э. Гудремон. – М. : Металлургия, 1966. – 736 с.
2. Францевич И. Н. Высокотемпературное окисление металлов и сплавов / И. Н. Францевич. – К. : Гостехиздат, 1963. – 323 с.
3. Архаров В. И. Окисление металлов при высоких температурах / В. И. Архаров. – М. : Metallurgizdat, 1945. – 171 с.
4. Приданцев М. В. Стали для котлостроения / М. В. Приданцев, К. А. Ланская. – М. : Metallurgizdat, 1959. – 303 с.