

УДК 621.771.23.01-97:620.18:669.15-194.018.26.001.5  
**СТРУКТУРА, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И СВОЙСТВА  
УЛЬТРАНИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ АВТОЛИСТОВОЙ СТАЛИ 010У**  
**В.З. Куцова, Т.В. Котова, В.Г. Иванченко\*, Чернованенко А.А.**

*Национальная металлургическая академия Украины*

*\*Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАНУ*

Для обеспечения конкурентоспособности отечественных конструкционных сталей необходимо разрабатывать технологии с учетом мировых тенденций развития данного класса материалов, учитывая проблемы отечественных потребителей автомобилестроительных сталей и особенности оборудования предприятий, производящих тонколистовую сталь для автомобильной промышленности. Одно из основных направлений развития материалов для кузова и других деталей автомобиля – увеличение объема применения высокопрочных сталей с целью повышения безопасности и снижения массы автомобиля.

В настоящее время крупнейшие металлургические компании, производящие автолистовую сталь, работают над созданием сталей с улучшенными потребительскими свойствами. Одно из наиболее важных направлений – высокоштампующий прокат из стали со сверхнизким содержанием углерода [1; 2].

Значительное влияние на способность стали к глубокой вытяжке оказывают величина, форма и однородность ферритных зерен. Длительный опыт отечественных и зарубежных металлургических заводов показал, что оптимальная величина зерна у листов 0,5–2,0 мм находится в пределах 26–37 мкм, у листов толщиной 2–5,0 мм достигает 37–52 мкм, что соответствует номеру 6–8. Лист из стали с величиной зерна 18 мкм хуже штампуются, пружинит, на нем образуется волнистость. Листы с зерном более 52 мкм хорошо штампуются, но поверхность отштампованных деталей менее гладкая. Зерно величиной 88–240 мкм приводит к значительной шероховатости поверхности штамповок, возникновению дефекта «апельсиновая корка» и разрушению листов при штамповке.

В зависимости от способности к вытяжке холоднокатаных листов для глубокой вытяжки допускается различие в величине зерна, не превышающее двух-трех номеров. Неодинаковая величина зерен вызывает неравномерную деформацию металла при глубокой вытяжке, что может привести к образованию трещин. [3].

По данным [4], качественные листы толщиной 1–1,5 мм для глубокой вытяжки, при малом содержании С, Мп, Si в низкоуглеродистой стали можно получить со следующими свойствами:  $\sigma_T \leq 160$  МПа,  $\sigma_B \leq 280$  МПа,  $\delta > 45$  %.

На способность стали к глубокой вытяжке большое влияние оказывает отношение  $\sigma_T/\sigma_B$ . Низкое значение этого отношения говорит о том, что сталь имеет значительный ресурс пластичности и лист при штамповке будет хорошо пластически деформироваться. При  $\sigma_T/\sigma_B \approx 0,6$  можно рассчитывать на очень хорошую способность стали к глубокой вытяжке, на хорошую – при  $\sigma_T/\sigma_B = 0,65–0,75$  и на плохую – при  $\sigma_T/\sigma_B > 0,75$ . На величину отношения в

основном влияет предел текучести: чем меньше  $\sigma_T$ , тем меньше отношение  $\sigma_T/\sigma_B$  [4].

Наилучшие условия штампуемости, по данным [3], обеспечиваются в случае, если листы обладают следующими механическими свойствами: относительное удлинение не менее 40%, твердость не выше 46 HRB ( 83 HRF ), отношение предела текучести к пределу прочности не более 0,65.

Уменьшение отношения  $\sigma_T/\sigma_B$  при неизменном пределе прочности на практике достигается правильным выбором технологических параметров прокатки. На величину предела текучести оказывает влияние химический состав, структура стали и степень деформации. Чем ниже предел текучести, тем больший объем металла может участвовать в пластической деформации и тем менее вероятно образование местного утонения и разрыв металла при вытяжке. В ГОСТ 9045 установлена норма по пределу текучести для проката с категорией вытяжки ВОСВ (весьма особосложная вытяжка) 175–185 МПа. Поскольку взаимосвязь между какой-либо одной характеристикой механических свойств и штампуемостью листов установить трудно, оценку способности стали к вытяжке производят по совокупности свойств ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_B$ ,  $\delta$  и HRB) [3].

За последнее десятилетие ведущие металлургические компании увеличивают производство стали, не содержащей примеси внедрения (IF-стали) в виде горячекатаного и холоднокатаного листа для автомобильной промышленности.

IF-стали высокопластичные, их структура стабилизирована микродобавками титана или/и ниобия, содержат сверхнизкое количество углерода ( $\leq 0,005$  %), который совместно с азотом полностью связан в карбиды, нитриды и карбонитриды. Прочность обусловлена упрочнением твердого раствора кремнием, марганцем и фосфором.

Низкие величины отношения  $\sigma_T/\sigma_B$  и высокая степень деформационного упрочнения этих сталей гарантируют высокие прочностные свойства и однородность толщины деталей кузова. Дополнительное микролегирование фосфором, кремнием и марганцем также повышает прочностные характеристики IF-сталей [1].

В работе исследовали карточки ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТ толщиной 3,5 мм, химический состав которой приведен в таблице 1.

Экспериментальные исследования температурно-деформационных режимов, проведенные в лаборатории ИЧМ НАНУ, представлены в таблице 2.

Размер зерен феррита измеряли на образцах вдоль направления прокатки, с помощью микроскопа «Neophot-21» по методике количественной металлографии Салтыкова [5], а также с помощью компьютерного обеспечения – программы Adobe Photoshop CS2. Микротвердость феррита в центральных и приповерхностных зонах полосы из сталей 01ЮТ определяли вдоль направления прокатки с помощью прибора ПМТ-3 по ГОСТ 9450–76 при нагрузке 20 Г и увеличении  $\times 485$  как среднюю величину из 50 замеров. Точность замера диагоналей отпечатка составляет 0,3% наименьшего деления шкалы микрометра. Твердость образцов определяли методом Роквелла по

стандартной методике. Измерение механических свойств проводили на универсальной машине «Инстрон» в соответствии с ГОСТ 1497–84 на образцах, вырезанных вдоль направления прокатки.

Распределение элементов в структуре ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТ изучали с помощью электронного микроскопа JSM «JEOL» 7000F с системой рентгеновского микроанализа при увеличении 200 крат. Исследования проводили в режиме вторичных электронов (SEI). Напряжение  $U = 20\text{кВ}$ . Время анализа составляло  $t = 60\text{ с}$ . Диаметр пучка составлял 1–1,5 мкм. В качестве эталонов были выбраны чистые образцы по Fe, Mn, Ti, Cr (чистота составляла 99,99%). Для Si в качестве эталона выбрано соединение  $\text{SiO}_2$ , для Al –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , для S –  $\text{FeS}_2$ , для P – GaP, для Ca –  $\text{CaP}_2$ .

Микроструктурные исследования стали 01ЮТ, прокатанной по режиму с нагревом до  $1000^\circ\text{C}$  в один проход в аустенитной области со степенью деформации 32,3%, исследованной вдоль направления прокатки (рис.1), показали, что в основном формируется зерно 5–3 номера по всему сечению полосы. Встречаются зерна размером 10–250 мкм в центральной и 25–250 мкм в поверхностной зоне полос. Некоторые зерна имеют вытянутую форму с соотношением осей 1:2,5 (1:1,5).

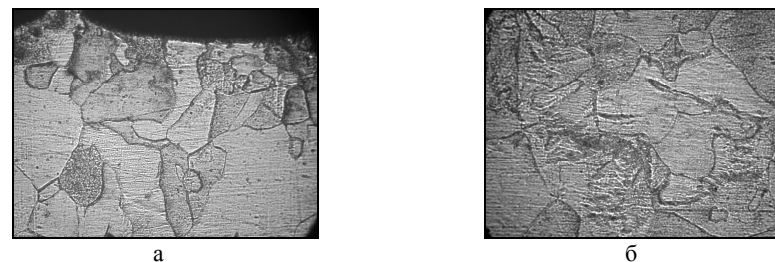


Рис. 1. Микроструктура стали 01ЮТ в поверхностной (а) и центральной (б) зонах полос;  $\times 200$ .

Значения механических характеристик образцов из стали 01ЮТ представлены в таблице 3.

Анализ таблицы 3 показал, что значение отношения  $\sigma_T/\sigma_B$  составляет для стали 01ЮТ, прокатанной в один проход – 0,53, что свидетельствует об очень хорошей способности к глубокой вытяжке. Также наблюдается сочетание хороших пластических свойств ( $\sigma_T/\sigma_B=0,5$ ) при  $\delta = 39\%$ . Значения микротвердости феррита в центральных зонах превышают значения, полученные в поверхностных участках полосы.

На рисунках 2 и 3 показана качественная картина распределения элементов в структуре ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТ в поверхностных и центральных зонах полос. Рисунок 2 свидетельствует о неравномерном распределении элементов в поверхностной зоне. В точках 1, 2, 4 наблюдаются спектры только Al и Si. Ближе к центру (т. 3, 5, 6–10) наблюдаются интерференционные максимумы Al, Ti, Ca, Mn, N, C, S, P, Si.

Таблица 1

Химический состав листовой ультранизкоуглеродистой стали марки 01ЮТ, прокатанной из исходной заготовки толщиной 3,5 мм

Марка стали	Содержание элементов, % (по массе)											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	N	Ca
01ЮТ	0,003	0,12	0,01	0,005	0,011	0,01	0,01	0,02	0,041	0,07	0,004	0,0003

Таблица 2

Температурно-деформационные режимы прокатки ультранизкоуглеродистой листовой стали 01ЮТ

Марка стали	$T_{\text{нагр}}$	$T_{\text{пр}}$	$h_0$	$h_1$	$\Delta h_1$	$\varepsilon_1$	$\Sigma\varepsilon$
	°C		мм		%		%
01ЮТ	1000	970-980	3,5	2,37	1,13	32,3	32,3

Примечания:  $T_{\text{нагр}}$  – температура нагрева листовой стали;  $T_{\text{пр}}$  – температура прокатки листовой стали;  $h_0$  – исходная толщина образца;  $h_1$  – толщина образца после обжатия металла;  $\Delta h_1$  – абсолютное обжатие металла;  $\varepsilon_1$  – относительная степень деформации металла;  $\Sigma\varepsilon$  – суммарная степень деформации металла.

Таблица 3

Значения механических характеристик образцов из стали 01ЮТ

$\sigma_{\text{в}}$ , МПа	$\sigma_{\text{т}}$ , МПа	$\sigma_{\text{т}}/\sigma_{\text{в}}$	$\delta_5$ , %	HRF	Значения микротвердости, МПа	
					поверхностная зона	центральная зона
260	140	0,53	39	61	890	1006

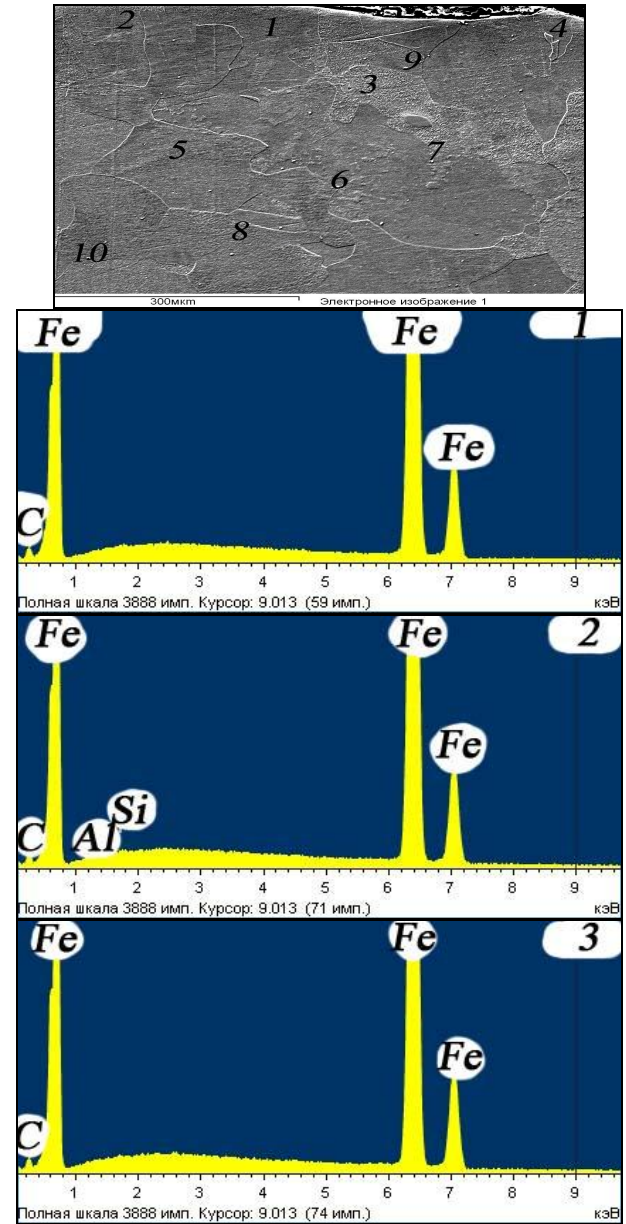
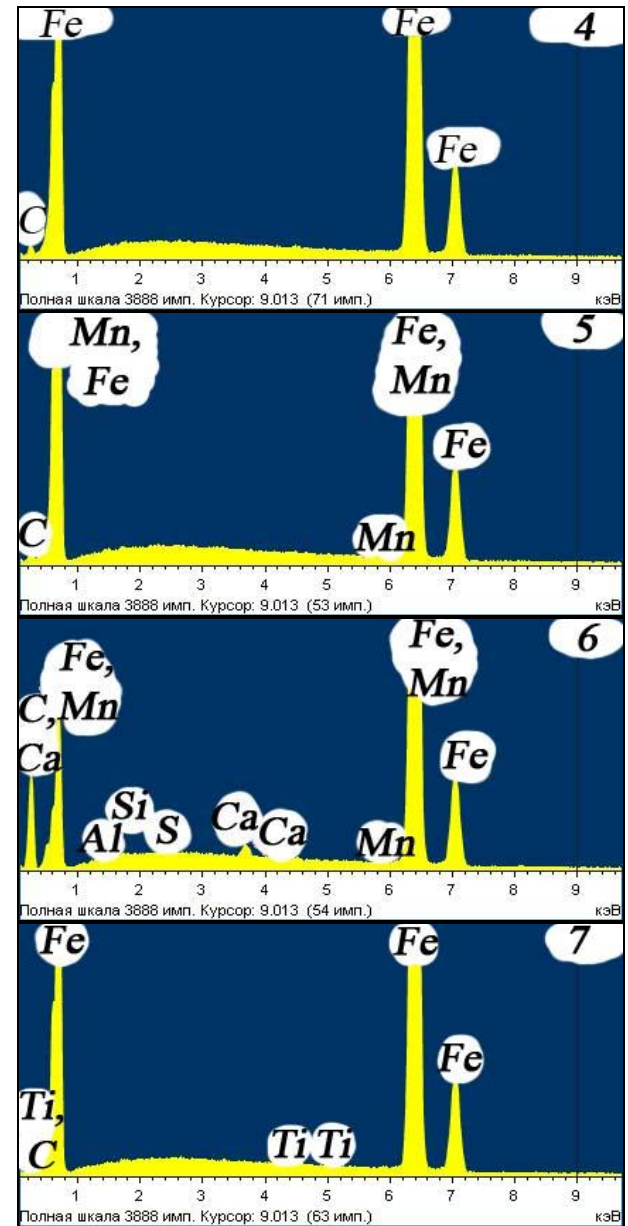
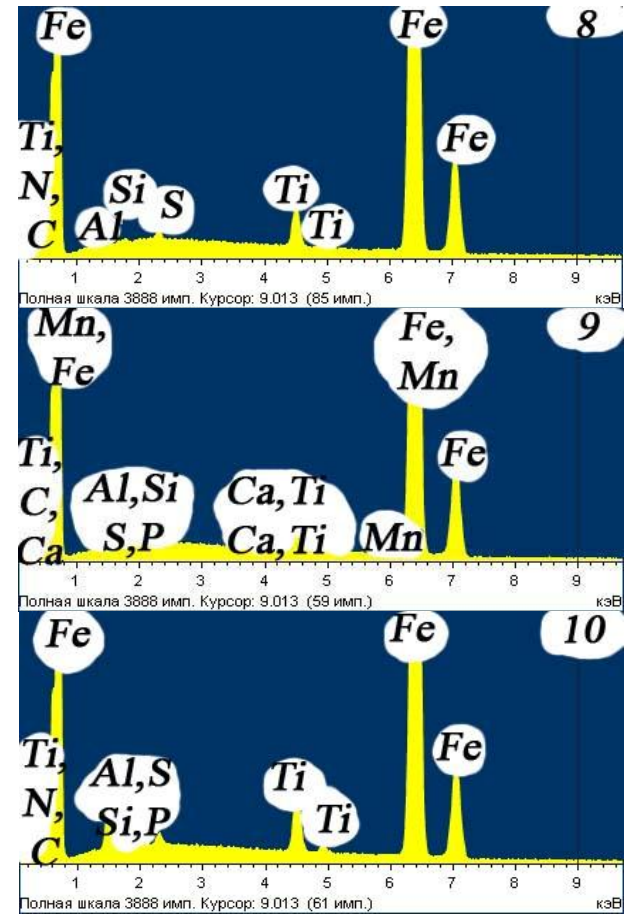


Рис. 2. Распределение элементов в структуре поверхностной зоны полос из ультраизокуглеродистой стали 01ЮТ.



Продолжение

Рис. 2



Окончание  
Рис. 2

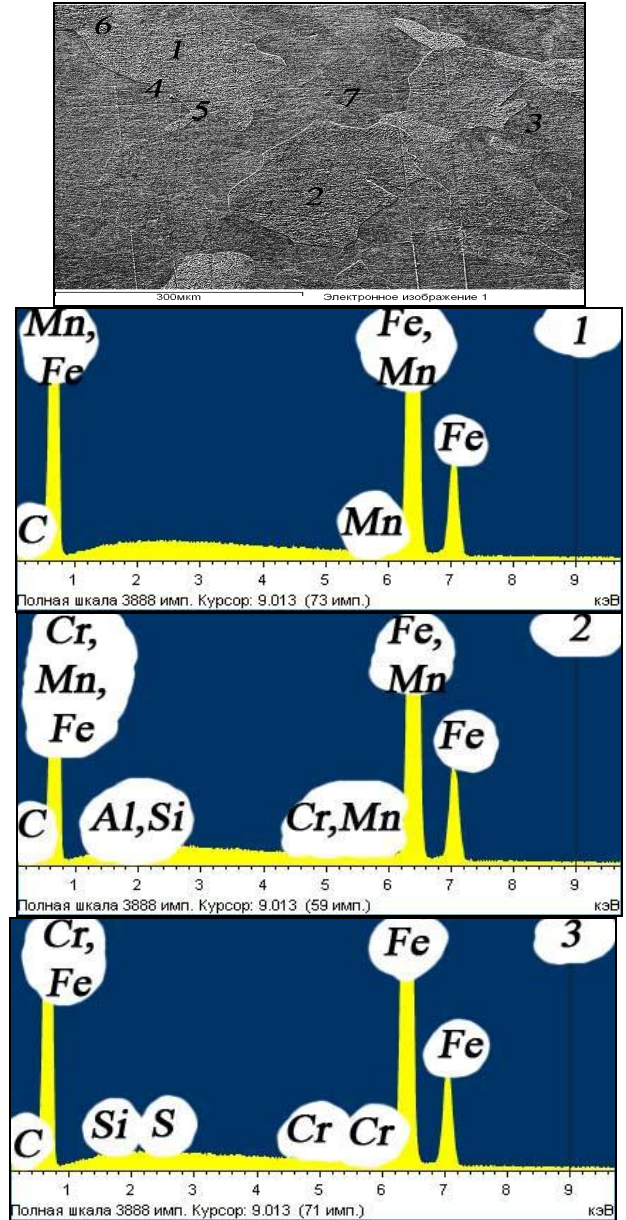
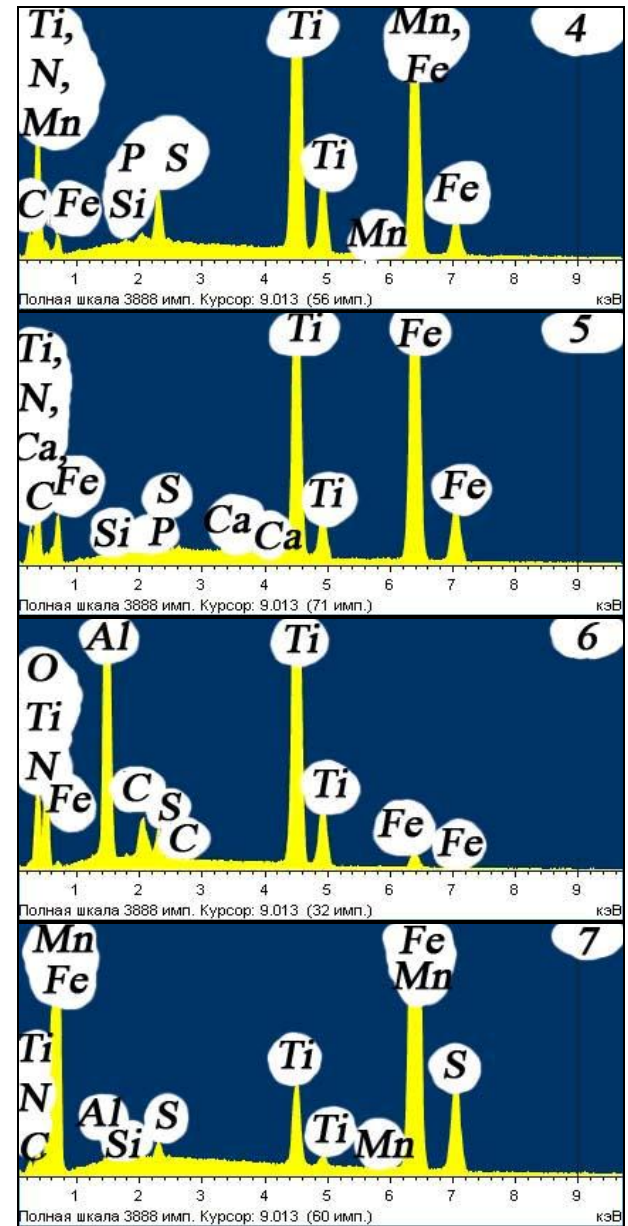


Рис. 3. Распределение элементов в структуре центральной зоны полосы из ультраизокуглеродистой стали 01ЮТ.





Окончание

Рис. 3

Анализ рисунка 3, распределения элементов в центральной зоне полосы стали 01ЮТ свидетельствует о том, что интерференционные максимумы Fe, C, Mn, Si, Ti, Al, S, P, N, Ca, Cr наблюдаются во всех исследуемых точках, т. о., распределение элементов в центральной зоне равномерное.

#### **ВЫВОДЫ**

1. При прокатке ультранизкоуглеродистой стали 01ЮТ в один проход в аустенитной области со степенью деформации 32,3%, исследованной вдоль направления прокатки, формируется неравномерная ферритная структура с равноосными зёрнами и с зёрнами вытянутой формы.
2. Ультранизкоуглеродистая сталь 01ЮТ обладает хорошей способностью к вытяжке и благоприятным сочетанием пластических свойств. Значения микротвёрдости феррита в центральных участках полосы превышают значения, полученные в поверхностной зоне.
3. Проведенный качественный локальный спектральный анализ показал неравномерное распределение элементов в структуре поверхностной зоны и равномерное распределение элементов в центральной зоне полосы из стали 01ЮТ.

#### **Литература**

1. Титов В. Стальной прокат для автомобильной промышленности за рубежом // Национальная металлургия. – 2004. – № 5. – С. 84–89.
2. Родионова И. Технологические аспекты производства сталей для автомобилестроения / И. Родионова, Г. Филиппов // Национальная металлургия. – 2004. – № 2. – С. 93–97.
3. Прокатка автолистовой стали / [Ф.А. Ксензук, Н.А. Трощенко, А.П. Чекмарев, М.М. Сафьян.]. – М.: Металлургия, 1969. – 296 с.
4. Дедек Вл. Полосовая сталь для глубокой вытяжки / Вл. Дедек. – М.: Металлургия, 1970. – 208 с.
5. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография / Саркис Адреевич Салтыков. – [3-е изд.]. – М.: Металлургия, 1970. – 375 с.