

Особенности двойникования в условиях высокоскоростного нагружения при сварке взрывом

Рыбин В.В.^{1†}, Ушанова Э.А.²

¹Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, г. С.-Петербург

²ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», г. С.-Петербург

[†]rybin.spb@gmail.com

Features of twinning under high-speed loading conditions during explosion welding

V.V. Rybin¹, E.A. Ushanova²

¹Saint-Petersburg State Polytechnical University, St. Petersburg

²FSUE CRISM "Prometey", St. Petersburg

Проведено систематическое исследование структур деформационного происхождения на микро-, мезо- и макроскопических структурно-масштабных уровнях в узкой приконтактной зоне соединения, полученного методом сварки взрывом, двух медных пластин. На участках, непосредственно прилегающих к поверхности контакта пластин, обнаружено существование пластических струй – участков аномальной локализации пластического течения металла. Внутри пластических струй происходит фрагментация. К числу обнаруженных в работе специфических особенностей процесса фрагментации в меди, обусловленных сверхвысокой скоростью интенсивной пластической деформации, следует отнести активную роль деформационного двойникования.

Ключевые слова: сварка взрывом, фрагментированная структура, микро-, мезо- и макроуровни пластической деформации, пластическая струя

Systematic studies of the structures of deformation origin at micro-, meso- and macrolevels in a narrow bond zone of a joint made by explosion welding of two copper sheets are carried out. In the layers adjacent to the contact interface between the sheets the existence of plastic streams, or sections of abnormal localization of metal's plastic flow, is revealed. Inside the plastic streams a fragmentation takes place. A specific feature of the fragmentation process is the active role of deformation twinning due to ultrahigh speed of severe plastic deformation.

Key words: explosion welding, fragmented structure, micro-, meso- and macrolevels of plastic deformation, plastic stream

1. Введение

Недавно были опубликованы предварительные результаты изучения структур деформационного происхождения в зонах, непосредственно примыкающих к волнообразной поверхности контакта пластин, соединённых методом сварки взрывом [1, 2]. Исследования проводили тремя различающимися методами структурного анализа: оптической металлографии, растровой и просвечивающей электронной микроскопии. Особенностью цитированных работ явилось то, что в них, по-видимому, впервые, удалось совместно использовать три столь разномасштабных метода для анализа структур деформационного происхождения на одном и том же специально выбранном участке приконтактной зоны сварного шва. В результате было сделано несколько оригинальных наблюдений.

Удалось показать, что при сварке взрывом пластическая деформация металла чрезвычайно неоднородна и, по мере приближения к поверхности контакта (ПК) свариваемых пластин, резко локализуется в узкой приконтактной зоне (УКЗ), где её величина и скорость увеличиваются на порядок. Более того, оказалось, что пластическая деформация в УКЗ представляет собой сложный процесс, одновременно развивающийся на трёх иерархически взаимосвязанных структурно-масштабных уровнях – микро, мезо и макро.

На макроуровне интенсивная пластическая деформация металла реализуется в форме специфических структурных элементов, которые непосредственно прилегают к ПК и возникают в результате локализации там аномально больших пластических деформаций. Они были названы нами пластическими струями [1, 2]. Они

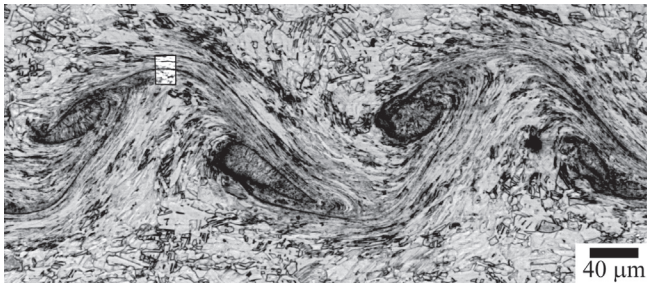
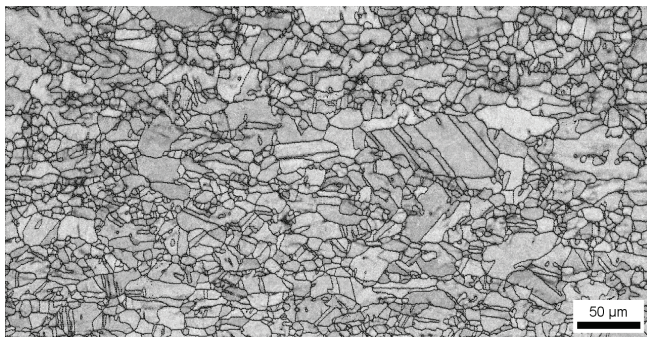


Рис. 1. Металлографическая структура УКЗ на продольном срезе бислойной пластины медь М1 – медь М1 (светлым прямоугольником отмечен участок, на котором была исследована структура методом EBSD).

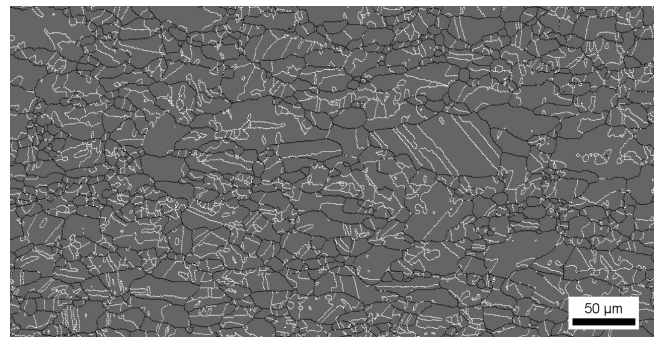
состоят из набора параллельных и тонких полос деформации (до 20 в каждой струе), толщиной 2 – 5 мкм.

На мезоуровне пластическое течение приводит к фрагментации деформируемого кристалла [3]. Фрагменты объединяются в мезополосы шириной (2–5) мкм (рис. 2 в).

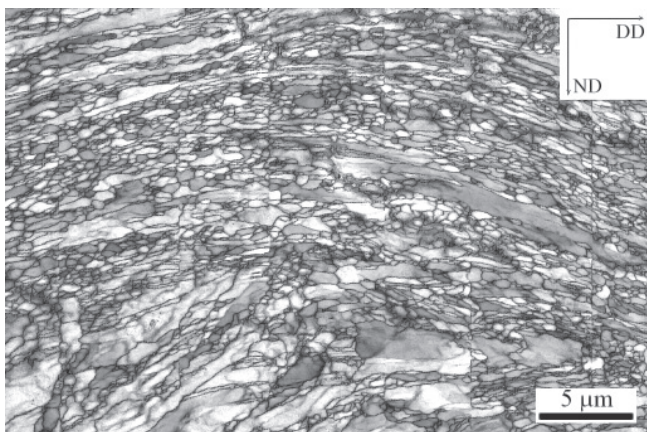
На микроуровне пластическая деформация осуществляется посредством классического механизма зарождения и трансляционного скольжения решёточных дислокаций [4, 5]. Однако следует иметь в виду, что при увеличении скорости деформации может реализоваться другой элементарный механизм пластической деформации, а именно деформационное двойникование. В настоящей работе рассматривается влияние двойникования, и, в частности, деформационного двойникования, на особенности структурообразования при сварке взрывом на микро-, мезо и макроуровнях пластической деформации.



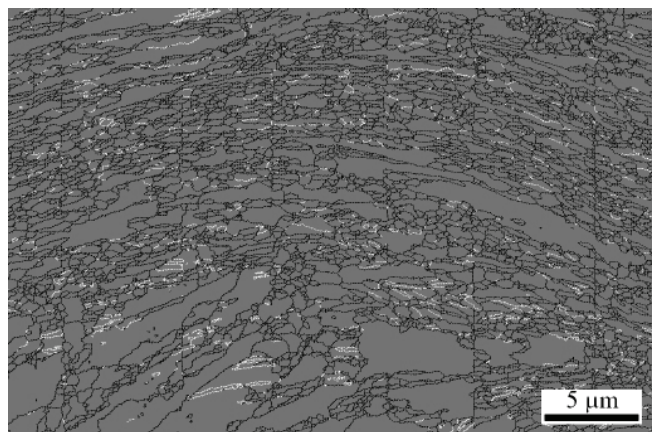
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Характерные участки референтной структуры (а, б) и фрагментированной структуры пластической струи (в, г). а, в – обычное изображение соответствующих структурных состояний, полученных методом EBSD-анализа (image quality maps) б, г – изображение тех же участков структур с выделенными (осветленными) двойниковыми границами. DD – направление детонации, ND – направление, перпендикулярное направлению детонации.

В настоящей работе изучали модельное соединение медь М1 – медь М1, полученное сваркой взрывом по режиму: скорость соударения $V_c = 500$ м/с, скорость контакта $V_k = 2120$ м/с, угол соударения $13,4^\circ$. Толщина свариваемых листов составляла 3 мм. Образцы для исследования подготавливали по специально разработанной методике, изложенной в [6]. Металлографический анализ проводили на оптическом металлографическом микроскопе Axio Observer A1m (Carl Zeiss). EBSD-анализ проводили на сканирующем двулучевом электронно-ионном микроскопе Quanta 200 3D FEG, используя стандартные методики. Дислокационные структуры внутри зёрен, двойников и фрагментов исследовали на высокоразрешающем просвечивающем электронном микроскопе Tescan S-Twin G2 30 с использованием метода одиночных рефлексов [7].

2. Морфологические и кристаллогеометрические характеристики референтной структуры

Для того, чтобы правильно понимать, как эволюционирует дефектная структура металла при сварке взрывом, проходя путь от исходной до реальной структуры приконтактной зоны, необходимо детально представлять себе, как была устроена эта исходная структура. Поскольку мы не располагали исходным металлом, то в качестве референтной исследовали структуру области, расположенной на расстоянии 1,5 мм от ПК.

На этом удалении от ПК выявляется структура, типичная для горячекатаных и хорошо отожжённых ли-

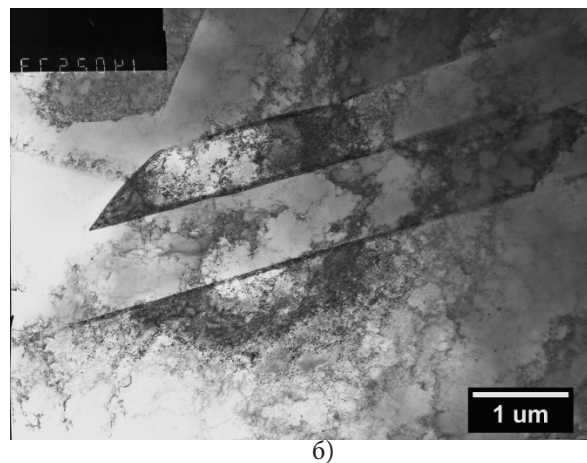
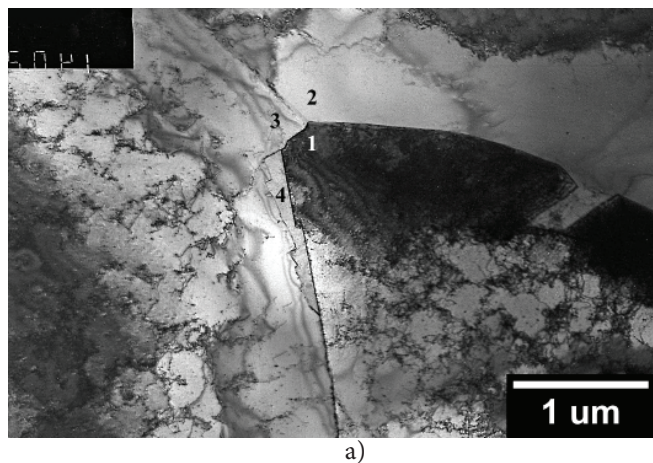


Рис. 3. Участки референтной структуры с микродвойниками: а – зарождение микродвойника отжига, б – деформационные микродвойники.

стов технически чистой меди. Величина среднего размера кристаллитов здесь составляет 16,7 мкм (рис. 2 а). Большую роль в формировании этой структуры играют двойники отжига.

Двойники отжига. О том, что в референтной структуре среди границ кристаллитов много двойниковых, можно судить по наличию в ней большого количества прямолинейных и фасетированных границ, типичных для когерентных двойников отжига. Внутри особо крупных кристаллитов можно наблюдать несколько параллельных, прямолинейных и даже пересекающихся их насквозь границ подобного рода. Для того, чтобы разобраться, какие из представленных в референтной структуре границ являются границами исходных зёрен, а какие – границами двойников, обратимся к рис. 2 б. На нём выявленные методом EBSD границы, близкие по критерию Брэндона к двойниковым (первого, второго и третьего порядков), выделены осветлением, а границы исходных зёрен оставлены в виде тёмных линий. Видно, что в референтной структуре двойниковых границ примерно столько же, сколько и обычных большеугловых границ. Все они находятся внутри зёрен и не пересекают межзёренных границ, то есть возникли после того, как в процессе прокатки сформировалась обычная зёрненная структура. Таким образом, выявленные на макроуровне референтной структуры двойники являются двойниками отжига и достались ей в наследство от исходной.

Возникает вопрос – есть ли в референтной структуре не наследственные, а новые двойники, возникшие в ней уже на стадии взрывной деформации. Чтобы ответить на него, референтная структура была исследована методами просвечивающей электронной микроскопии. В качестве примера рассмотрим рис. 3 а. На нём представлен участок референтной структуры, включающий в себя тройной стык зёрен, пронумерованных числами 1, 2 и 3. Внутри всех зёрен под воздействием однородной пластической деформации сформировалась ячеистая структура. Ячейки приблизительно равноосны. Их диаметр близок к 0.5 мкм. Они образованы типичными для ячеистых структур плотными дислокационными малоугловыми границами и хаотически разориентированы на углы (0.1° – 0.2°). В зерне 3 вдоль большеугловых границ 2-3 и 2-1 наблюдается область, свободная от ячеек, шириной около 0.7 мкм. По всей вероятности, образование её связано с локальной активизацией в этой приграничной зоне диффузионных процессов, поскольку именно здесь, на границе зёрен 1-3 вблизи тройного стыка 1-2-3, произошла термоактивируемая реакция отщепления, подрастания и последующей миграции участка новой двойниковой границы. Вакансионные потоки, сопровождающие подрастание микродвойника отжига, должны были дестабилизировать и разрушить расположенные поблизости малоугловые дислокационные границы, что и наблюдается экспериментально. Методом одиночных

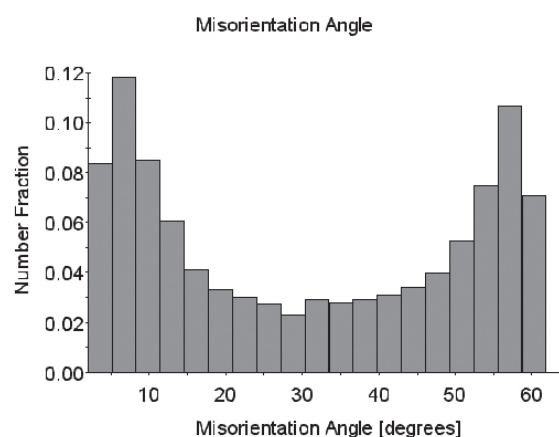
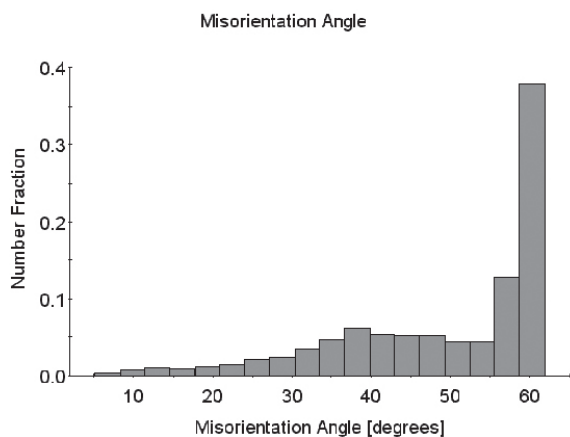


Рис. 4. Распределение кристаллитов по разориентировкам в референтной (а) и фрагментированной (б) структурах.

Таблица 1.

Данные кристаллографического анализа зарождения микродвойника отжига, (рис. 3 а).

Пара зерен	Угол разориентировки, град	Специальный угол, град	$\langle P \ Q \ R \rangle$ в кристалле	Кристаллографически точное значение $\langle P \ Q \ R \rangle$
1-2	46.4167		$[-0.5447-0.3910-0.7419]$	
1-3	38.6008 (сигма 9)	38.94	$[0.7147-0.6993-0.0149]$	$[1-10]$
2-3	62.1602		$[-0.67990.29550.6712]$	
4-3	54.3724 (сигма 3)	60	$[0.58620.60120.5431]$	$[111]$
4-1	60.2823 (сигма 3)	60	$[0.49750.5597-0.6627]$	$[11-1]$

рефлексов с погрешностью измерений, не превышающей 1° , были проанализированы векторы разориентировок $\theta = \theta[p, q, r]$ на всех трёх границах, образующих стык. Оказалось, что граница (1-3) является границей, близкой к границе двойника второго порядка, а вновь образовавшаяся граница (1-4) близка к границе двойника первого порядка (табл. 1).

Рассмотренный пример показывает, что вдали от поверхности контакта при сварке взрывом может происходить зарождение микродвойников отжига, которые, правда, успевают подрасти за время взрыва всего примерно до 1 мкм в длину и до 0.2 мкм в толщину. Зарождение новых микродвойников отжига приводит вблизи них к разрушению ранее созданных структур деформационного происхождения.

Деформационные двойники. Деформационные микродвойники, напротив, вносят дополнительный вклад в развитие структур деформационного происхождения. На рис. 3 б приведен пример таких микродвойников. Они имеют стамескообразную форму заострённых плоскопараллельных пластинок толщиной 0.5–1 мкм. Угол в вершине клина, равен приблизительно 30° . Деформационные микродвойники пересекают существующую ячеистую структуру, не разрушая её, а лишь разворачивая и сдвигая границы ячеек, сообразно с особенностями кристаллогеометрии деформационного двойникования. По всей вероятности деформационное микродвойникование происходит тогда и там, когда и где на фоне уже сформировавшейся ячеистой структуры исчерпываются возможности релаксации взрывообразно нарастающих упругих напряжений за счёт развития обычных дислокационных механизмов, и природа оказывается вынужденной запускать альтернативный и более динамичный процесс пластической деформации. При этом происходит формирование и накопление дополнительных (по отношению к обычным мало- и большеугловым границам) элементов мезоструктур деформационного происхождения – границ с двойниковыми разориентировками.

Распределение кристаллитов по разориентировкам. Распределение по углам разориентировок кристаллитов, выявляемых на шлифах референтной структуры, представлено на рис. 4 а. Можно выделить два пика: $\theta_{\max} = 35^\circ\text{--}38^\circ$ и $\theta_{\max} = 57^\circ\text{--}60^\circ$, которые соответ-

ствуют слегка размытым пикам двойниковых разориентировок второго и первого порядка. Следует отметить также практически полное отсутствие в референтной структуре зёрен с малоугловыми разориентировками.

3. Структуры деформационного происхождения внутри пластической струи

Структуры деформационного происхождения, характерные для мезо- и макро-уровней строения пластической струи областей, расположенных непосредственно над вершиной волны рельефа ПК (рис. 1), представлены на рис. 2 в, г.

Первое, что бросается в глаза – это полное отсутствие в пластической струе каких-либо признаков и элементов исходной (референтной) структуры. Сосредоточенная в пределах пластической струи интенсивная пластическая деформация полностью размолотила и переработала исходную структуру, преобразовав её в принципиально другую – структуру деформационного происхождения. В общих чертах мезо- и макроструктуры этого типа были описаны выше. В настоящем разделе приведена более подробная информация, касающаяся статистики распределения фрагментов по разориентировкам и границ двойников.

Распределение фрагментов по разориентировкам. Распределение фрагментов по разориентировкам приведено на рис. 4 б. Оно представляет собой наложение двух пиков примерно одинаковой формы и площади. Один из них – малоугловой с вершиной, отвечающей углу разориентировки $\theta = 3.6\text{--}6.7^\circ$. Второй пик – большеугловой с вершиной, расположенной при $\theta = 54\text{--}57.1^\circ$. Минимум распределения соответствует углу $\theta = 25.6\text{--}28.8^\circ$. Пики описывают границы деформационного происхождения разной природы. Малоугловой, поскольку его не было в референтной структуре, рис. 4 а, следует отнести к распределению разориентировок фрагментов, появившихся в процессе интенсивной пластической деформации. Возникновение большеуглового пика связано с двойниковыми границами, ранее существовавшими в референтной структуре или сформировавшимися непосредственно в ходе интенсивной пластической деформации. Последнее предположение требует

экспериментального обоснования, так как во фрагментированной структуре пластической струи отсутствуют морфологические признаки границ двойников. Чтобы визуализировать двойниковые границы на этом участке, необходимо проанализировать все имеющиеся здесь границы на близость к специальным по критерию Брэндона и осветлением выделить те, что удовлетворяют этому критерию. Соответствующая карта границ зерен приведена на рис. 2 г.

Границы двойников во фрагментированной структуре. Из рис. 2 г видно, что во фрагментированной структуре пластической волны действительно присутствует много границ, близких к двойниковым. По своим морфологическим признакам они практически неотличимы от прочих границ фрагментов – так же ориентированы относительно ПК, так же искривлены, так же участвуют в формировании мезополос. Часто двойниковые границы являются как бы небольшими кусочками более длинных обычных границ и, наоборот, кусочки обычных границ могут встраиваться в более длинные двойниковые границы. На всём анализируемом участке можно отметить лишь пару примеров классических деформационных двойников: тонких, с толщиной около (0.2 – 0.3) мкм, прямолинейных пластин, пересекающих наиболее крупные, толщиной (10 – 15) мкм, нефрагментированные кристаллиты.

Доля двойниковых границ во фрагментированной структуре составляет 6.6 %, что в восемь раз меньше, чем в референтной структуре. Однако информация о доле двойниковых границ сама по себе ещё недостаточна для правильного понимания сути идущих процессов, ибо в референтной структуре общая длина границ гораздо меньше, чем в фрагментированной. По этой причине при меньшей доле двойниковых границ общая длина их в фрагментированной структуре может оказаться больше, чем в референтной, что стало бы статистически обоснованным доказательством вклада деформационного двойникования в формирование мезоструктуры пластической струи.

Чтобы разобраться в этой сложной ситуации, вычислим удельные длины границ, близких к специальным (как отношение длины границ, близких к специальным, к площади сканируемого участка), для референтной и фрагментированной структур, воспользовавшись данными EBSD-сканирования. Во фрагментированной структуре пластической струи длина двойниковых границ оказывается в 3 раза больше, чем в исходной. Это указывает на то, что в условиях высокоскоростной интенсивной пластической деформации значительную роль в формировании фрагментированной структуры

технически чистой меди играет деформационное двойникование [8].

4. Заключение

Показано, что при сварке взрывом в узкой приконтактной зоне происходит аномально большая по величине локализация пластического течения, которое реализуется в виде образования и развития специфических структурных элементов – пластических струй. Внутри пластических струй происходит фрагментация. К числу обнаруженных в работе специфических особенностей процесса фрагментации в меди, обусловленных сверхвысокой скоростью интенсивной пластической деформации, следует отнести активную роль деформационного двойникования.

Литература

1. Рыбин В.В., Ушанова Э.А., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Природа пластического течения металлов в приконтактной зоне при сварке взрывом. Письма в ЖТФ, 2011, Т 37, Вып. 23. С. 26 – 33.
2. Rybin V.V., Ushanova E.A., Kuzmin S.V., Lysak V.I. Explosively welded materials bond zone: morphology and crystallography. Rev. Adv. Mater. Sci., 2012, V. 31, P. 14 – 34.
3. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия, 1986, 224 с.
4. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. М.: Мир, 1972, 408 с.
5. Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир, 1967, 644 с.
6. Ушанова Э.А., Нестерова Е.В., Петров С.Н., Рыбин В.В. Новые методики пробоподготовки и аттестации нанокристаллических зон в разнородных соединениях, полученных сваркой взрывом. Перспективные материалы, 2011, спец. вып. (12), С. 516 – 522.
7. Рыбин В.В., Рубцов А.С., Нестерова Е.В. Метод одиночных рефлексов (ОР) и его применение для электронно-микроскопического анализа дисперсных фаз. Заводская лаборатория, 1982, №5, С. 21 – 26.
8. Эпштейн Г.Н. Строение металлов, деформированных взрывом. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1988, 280 с.