

## ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА ТРУБ АКТИВНОЙ ЗОНЫ АТОМНЫХ РЕАКТОРОВ В ПРОЦЕССЕ ДОРЕАКТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

*Е.Я. Лезинская, Т.Н. Буряк*

*Государственный трубный институт им. Я.Е. Осады, г. Днепрпетровск, Украина*

Проведен анализ стандартных методов оценки одного из основных показателей качества металла – зеренной структуры аустенитных сталей и сплавов на основе циркония и титана, применяемых в качестве конструкционных материалов активной зоны атомных реакторов. Показана несостоятельность стандартных методов оценки величины зерна в реальных изделиях. Предложен метод компьютерного моделирования зеренной структуры труб-оболочек ТВЭЛ и ТВС при разработке режимов термической обработки.

Одной из основных характеристик качества металла труб активной зоны атомных реакторов (АР) является величина зерна, поскольку существует достаточно строгая, хотя и мало изученная материаловедами зависимость "структура-свойства".

При этом особое значение, как показали многочисленные исследования, приобретает такой параметр зеренной структуры как разнородность, которая обуславливает однородность тех или иных свойств готового изделия.

Насколько важен этот показатель, можно судить по тем требованиям, которые предъявляют к трубам активной зоны АР (табл. 1):

- рекристаллизованная структура и коэффициент анизотропии в трубах-оболочках ТВЭЛ из циркония;
- пределы допустимой величины зерна в трубах-оболочках ТВЭЛ из коррозионностойкой стали для реакторов на быстрых нейтронах;
- пределы допустимой величины зерна и разнородности для труб 2-го и 3-го контуров АР.

Особенно жесткие требования по структуре и свойствам предъявляют к трубам-оболочкам ТВЭЛ и ТВС, поскольку ТВЭЛ работает в очень тяжелых условиях. На него действуют мощные потоки быстрых и тепловых нейтронов, отличающихся неравномерностью; при передаче больших тепловых потоков в оболочке возникают значительные термические напряжения; вода высоких параметров оказывает коррозионное и эрозионное воздействие на оболочку, еще сильнее коррозионное воздействие воды в состоянии кипения; на стенках ТВЭЛов осаждаются соли, повышающие температуру и ускоряющие коррозию; в жидких металлах и сплавах наблюдается нежелательное явление – перенос массы (высаживание металлов и их соединений на холодных участках); органические теплоносители, полимеризуясь, образуют осадки на оболочках ТВЭЛов; при распухании ТВЭЛа возникают дополнительные тангенциальные напряжения в оболочке – все это отрицательно влияет на их работу при длительной эксплуатации.

Работоспособность ТВЭЛа в реакторе определяется тремя факторами: конструкцией, качеством изготовления и режимом эксплуатации активной зоны. Такие же факторы определяют и работу ТВС.

Самую большую трудность при конструировании ТВС представляет такое дистанционирование ТВЭЛов в ней, при котором ТВС одновременно удовлетворяет механическим (прочность конструкции), гидродинамическим (малое сопротивление и равномерное охлаждение ТВЭЛов), теплотехническим и другим требованиям.

Следует обеспечивать свободное передвижение ТВЭЛов в ТВС при их тепловом расширении, а также предотвращать механическое воздействие на ТВЭЛы со стороны кожуха и крепежных деталей ТВС.

Рассматривая требования, предъявляемые к ТВЭЛам и ТВС, необходимо сразу оговорить два из них, вытекающие из задачи создания АР определенного типа: во-первых, в ТВЭЛе должно содержаться столько ядерного топлива, сколько необходимо на всю расчетную кампанию, и во-вторых, ТВЭЛ и ТВС должны надежно работать всю кампанию, выдерживая расчетные выгорания топлива без разрушения оболочки. Первое условие обеспечивается при изготовлении топливной таблетки, а второе – изготовлением трубы-оболочки. Отсюда требования к конструкции и материалу:

- механическая прочность и равномерность по длине и сечению оболочки;
- сохранение формы, размеров и герметичность в течение всего периода работы ТВЭЛа и ТВС.

Все эти качества должны быть обеспечены соответствующей технологией получения изделия, в частности трубы-оболочки, начиная от выплавки металла до готового изделия – тонкостенной трубы.

Обычно технология изготовления труб-оболочек ТВЭЛ и ТВС включает целый ряд операций деформации, чередующийся с термической и химической обработкой по специально разработанным режимам.

Конечной целью разработки таких режимов является создание однородной структуры с регламентирован-

ной величиной зерна, которая, в свою очередь, обеспечивает соответствующую конструктивную прочность материала [1].

В большинстве случаев процессом, ответственным за формирование такой структуры, в особенности в

однофазных высоколегированных сталях и сплавах специального назначения является собирательная рекристаллизация.

Таблица 1

Требования к трубам активной зоны реакторов различного типа

Нормативный документ	Марка стали или сплава	Регламентированные требования	Нормы требований к зеренной структуре (размер зерна, номер)	Методы контроля размера зерна	Примечание
ТУ 14-3-550-80 "Трубы бесшовные особотонкостенные повышенного качества из коррозионностойкой стали ЭИ 844БУ-ИД"	026X16H15M3-БУ-ИД (ЭИ 844БУ-ИД)	1. Химический состав 2. Неметаллические включения 3. Размер аустенитного зерна 4. Механические свойства при растяжении при 20 и 375 °С 5. Стойкость к межкристаллитной коррозии 6. Качество поверхности	G7...11	Металлографический по шкалам ГОСТ 5639-82 на 3%, но не менее чем от 3-х труб партии, или 100% неразрушающий контроль	Арбитражный метод контроля размера зерна – металлографический по шкалам ГОСТ 5639-82
ТУ 14-3-219-89 "Трубы бесшовные особотонкостенные из коррозионностойкой стали аустенитного класса"	03...09X18H10T, 015... 08X16H15M3Б, (типа ЭИ 844, ЭИ 547 и ЭП 172) ХН40Б (ЭП 337)	1. Химический состав 2. Неметаллические включения 3. Размер зерна 4. Механические свойства при растяжении в интервале 20...650 °С (в зависимости от марки стали) в ряде случаев нормы факультативны 5. Стойкость к межкристаллитной коррозии 6. Качество поверхности	G7...10, а для стали типа ЭИ 844 G7...11; допускается в 25% труб размер зерна не более G6	Металлографический по шкалам ГОСТ 5639-82 на каждой трубе или неразрушающий контроль	
ТУ 14-3-197-89 "Трубы бесшовные из коррозионностойких марок стали с повышенным качеством поверхности"; ТУ 14-3Р-197-2001 "Трубы бесшовные из коррозионностойких сталей с повышенным качеством поверхности"	08X18H10T 08X18H12T	1. Химический состав 2. Неметаллические включения 3. Размер аустенитного зерна 4. Механические свойства при растяжении при 20 и 350 °С 5. Стойкость к межкристаллитной коррозии 6. Качество поверхности	Не крупнее G4	Металлографический по шкалам ГОСТ 5639-82 на 5% труб и 100% неразрушающий контроль	

<p>ТУ 14-3-1511-87 "Трубы холоднодеформированные особотонкостенные повышенного качества из стали марок 06X16H15M2Г2ТФР-ИД (ЧС 68-ИД) и 12X12M1БФР-Ш (ЭП 450Ш)</p>	<p>06X16H15M2Г2ТФР (ЧС 68) и 12X12M1БФР-Ш (ЭП 450Ш)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Химический состав</li> <li>2. Неметаллические включения</li> <li>3. Размер зерна</li> <li>4. Механические свойства при растяжении при 20, 600 и 650 °С</li> <li>5. Стойкость к межкристаллитной коррозии</li> <li>6. Качество поверхности</li> </ol>	<p>Для стали ЧС-68 поставка в холоднодеформированном состоянии (<math>\epsilon \sim 20\%</math>), размер зерна аустенита перед деформацией не более G7, не допускается G11 и менее. Для стали ЭП-450 – размер зерна феррита – не более G7</p>	<p>Металлографический по шкалам методика ВНИТИ 7-95-80 и ГОСТ 5639-82 на каждой трубе</p>	<p>В арбитражных случаях разрешается количественным методом по методике ВНИТИ 1-7-86</p>
---	---	--	---	---	--

Продолжение таблицы 1

<p>ТУ У 27.1-8-53-2001 "Трубы бесшовные холоднодеформированные из сплава циркония Zr1Nb"; ТУ 95.2594-96 "Трубы бесшовные холоднокатаные из сплава циркония марки Э 110"</p>	<p>Сплав Zr с 1% Nb</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Химический состав</li> <li>2. Рекристаллизованное состояние металла труб</li> <li>3. Механические свойства при растяжении в продольном и поперечном направлении при 20 и 380 °С</li> <li>4. Коэффициент анизотропии <math>\sigma_{0,2}</math> при 380 °С</li> <li>5. Коэффициент ориентации гидридов</li> <li>6. Коррозионная стойкость в водяном паре</li> <li>6. Качество поверхности и др.</li> </ol>	<p>Размер зерна нормирован, определяют по согласованию с потребителем</p>	<p>Металлографический по методике предприятия-изготовителя на 2-х трубах от партии от каждого конца трубы или другим согласованным методом</p>	
<p>ASTM B 811-90 "Standard Specification for Wrought Zirconium Alloy Seamless Tubes for Nuclear Reactor Fuel Cladding"</p>	<p>Циркалой (Zr - Sn)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Химический состав</li> <li>2. Размер зерна после рекристаллизационного отжига</li> <li>3. Механические свойства при растяжении в продольном и поперечном направлении при 20°С и по требованию потребителя при повышенной температуре</li> <li>4. Коэффициент ориентации гидридов</li> <li>5. Коррозионная стойкость в водяном паре</li> <li>6. Качество поверхности и др.</li> </ol>	<p>Размер зерна номер G7 и менее</p>	<p>Металлографический по методике стандарта ASTM E112</p>	
<p>ТУ 14-3-820-79 "Трубы бесшовные холоднодеформированные из сплавов"</p>	<p>ПТ-1М, ПТ-7М (на основе титана)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Химический состав</li> <li>2. Не допустимы инородные включения</li> <li>3. Механические свойства при растяжении при 20 и 150 °С</li> <li>4. Отсутствие альфированного слоя</li> <li>5. Качество поверхности</li> </ol>	<p>Не регламентируется</p>	<p>Не контролируется</p>	

ТУ 14-3-843-79 "Трубы бесшовные особотонкостенные из сплавов ПТ-1М и ПТ-7М"	ПТ-1М, ПТ-7М (на основе титана)	1. Химический состав 2. Не допускаются инородные включения 3. Механические свойства при растяжении при 20 °С 4. Отсутствие альфированного слоя 5. Качество поверхности	Не регламентируется	Не контролируется	
--	---------------------------------------	--	---------------------	-------------------	--

Обычно [2] эта стадия наступает после рекристаллизации обработки, т.е. после того как выросшие центры рекристаллизации приходят во взаимное соприкосновение, и заключается в росте одних новых зерен за счет других тоже новых. Иными словами, создается зеренная структура, характеризуемая определенным распределением зерен по размерам. Следовательно, конечной целью создания той или иной структуры является нахождение параметров ее распределения в объеме готового изделия, т.е. распределение зерен в объеме этого изделия.

В идеале кривая распределения зерен по размерам в ходе собирательной рекристаллизации должна иметь вид нормального распределения и с увеличением температуры и выдержки при нагреве смещаться в сторону больших размеров (рис. 1,а). Однако в реальных структурах обычно после рекристаллизации обработки собирательная рекристаллизация, как правило, сопровождается вторичной (рис. 1,б), что существенно осложняет изучение процессов формирования зеренной структуры, а соответственно, и прогнозирование свойств готового изделия, что обусловлено значительным отклонением такого распределения от нормального.

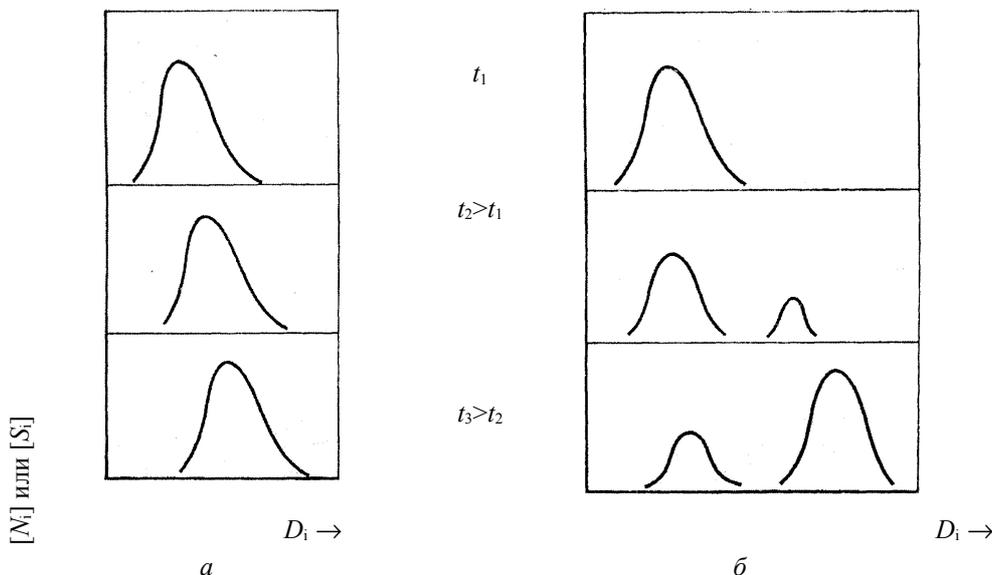


Рис. 1. Схема изменения распределения зерен по размерам в процессе собирательной (а) и вторичной (б) рекристаллизации ( $N_i$  – число зерен данного размера;  $S_i$  – площадь, занимаемая зернами данного размера)

В то же время оценку такой структуры в заводской практике производят методом визуального сравнения с фотоэталоном соответствующих стандартов в условных единицах – номерах. Помимо того, что такая оценка является субъективной, она еще допускает большую погрешность измерения, так как принятое в стандартах допущение оценки величины зерна с точностью в один номер предусматривает фактическое изменение погрешности от 1 до 100 мкм.

Наиболее распространенными методами оценки величины зерна являются стандарт ASTM E 112 "Стандартные методы испытаний для определения средних размеров зерна, а также ГОСТ 5639 "Стали и сплавы. Методы выявления и определения величин

ны зерна" и ГОСТ 21073.0-75 – ГОСТ 21073.4-75 "Металлы цветные. Определение величины зерна".

Анализ основных методов определения величины зерна в металлических изделиях показал следующее.

Использование методов, предусмотренных указанными стандартами, не относится к точным измерениям, так как, во-первых, визуальные методы сравнения с фотообразцами вносят субъективизм в оценку тем или иным оператором, а во-вторых, структура металла в объеме является совокупностью трехмерных объектов (зерен), в то время как плоское сечение, видимое оператором на шлифе, включает распределение размеров сечений зерен от нуля

до максимального его размера в объеме, что приводит к ошибочной оценке разнотерности готового изделия.

Эти стандарты построены на принципах оценки зеренной структуры на плоском срезе методом применения ступенчатых шкал (фотоэталонов), где каждому номеру зерна  $G$  соответствует:

- для стандарта ASTM E 112 количество зерен  $N_A$  на площади в 1 дюйм<sup>2</sup> в соответствии с выражением  $N_A = 2^{(G-1)}$  шт./дюйм<sup>2</sup>;
- для ГОСТ 5639 количество зерен  $m$  на площади в 1 мм<sup>2</sup>, изменяющееся по геометрической прогрессии, в соответствии с выражением  $m = 8 \times 2^G$  шт./мм<sup>2</sup>;
- аналогичный принцип заложен ГОСТ 21073.0-75 – ГОСТ 21073.4-75, где основные показатели величины зерна (номер зерна, средний и средний условный размеры зерна, средняя площадь сечения зерна и среднее количество зерен на 1 мм<sup>2</sup> площади шлифа) совпадают с показателями ГОСТ 5639.

Различие в оценке зеренной структуры по рассмотренным стандартам в том, что в качестве номеров в отечественных стандартах применяют только целые числа (от 3 до 14 по ГОСТ 5639 и по ГОСТ 21073.0-75 – ГОСТ 21073.4-75), а в ASTM E 112 ряд рациональных чисел 0; 0,5; 1,0; 1,5; и т.д. до 14 включительно. При этом ГОСТ 5639 предусматривает ряд условностей, которые допускают двоякое толкование одной и той же величины, что недопустимо при оценке качества изделия ответственного назначения.

Наиболее серьезным недостатком стандарта ГОСТ 5639 является допустимость оценки разнотерности структур в номерах, что некорректно по форме и ошибочно по содержанию. Некорректно по форме, так как расчеты показывают, что плоский срез пространственной структуры, состоящей из абсолютно одинаковых шаров, будет иметь 28% диаметров плоских сечений зерен размерами в интервале от 0 до  $D$ . В то же время ГОСТ 5639 (п. 3.3.6) предусматривает оценивать структуру двумя и более номерами в случае, если на исследуемой поверхности шлифа имеются зерна "...отличающиеся от основного (преобладающего) номера, соответствующего определенному эталону шкалы, более чем на 1 номер и занимающую на шлифе площадь более 10%".

Ошибочно по содержанию, так как прямой эксперимент обнаруживает значительное расхождение между оценкой одной и той же структуры ТВЭльных труб  $\varnothing 7 \times 0,3$  мм из стали 026X16N15M3Б сравнением с фотообразцами ГОСТа 5639 и методом измерения длин хорд того же ГОСТа. Результаты оценок, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о значительном расхождении между величиной зерна в одном и том же образце, но определенном различными методами. При этом расхождение тем больше, чем больше разнотерность. Такое расхождение в

оценке по ГОСТ 5639 связано с самым серьезным недостатком этого стандарта, а именно, допущением присутствия в каждом номере минимального и максимального числа зерен соседних номеров, а следовательно, присутствие в каждом номере зерен минимального и максимального диаметров, причем, таким образом, что каждая из этих величин относится одновременно к двум соседним номерам. Например, G6 min одновременно является G7 max и т.д.

Эти стандарты построены на принципах оценки зеренной структуры на плоском срезе методом применения ступенчатых шкал (фотоэталонов), где каждому номеру зерна  $G$  соответствует:

- для стандарта ASTM E 112 количество зерен  $N_A$  на площади в 1 квадратный дюйм в соответствии с выражением  $N_A = 2^{(G-1)}$  шт./дюйм<sup>2</sup>;
- для ГОСТ 5639 количество зерен  $m$  на площади в 1 квадратный миллиметр, изменяющееся по геометрической прогрессии, в соответствии с выражением  $m = 8 \times 2^G$  шт./мм<sup>2</sup>;
- аналогичный принцип заложен ГОСТ 21073.0-75 – ГОСТ 21073.4-75, где основные показатели величины зерна (номер зерна, средний и средний условный размер зерна, средняя площадь сечения зерна и среднее количество зерен на 1 мм<sup>2</sup> площади шлифа) совпадают с показателями ГОСТ 5639.

Различие в оценке зеренной структуры по рассмотренным стандартам в том, что в качестве номеров в отечественных стандартах применяют только целые числа (от 3 до 14 по ГОСТ 5639 и по ГОСТ 21073.0-75 – ГОСТ 21073.4-75), а в ASTM E 112 ряд рациональных чисел 0; 0,5; 1,0; 1,5; и т.д. до 14 включительно. При этом ГОСТ 5639 предусматривает ряд условностей, которые допускают двоякое толкование одной и той же величины, что недопустимо при оценке качества изделия ответственного назначения.

Наиболее серьезным недостатком стандарта ГОСТ 5639 является допустимость оценки разнотерности структур в номерах, что некорректно по форме и ошибочно по содержанию.

Некорректно по форме, т.к. расчеты показывают, что плоский срез пространственной структуры, состоящей из абсолютно одинаковых шаров, будет иметь 28% диаметров плоских сечений зерен размерами в интервале от 0 до  $D$ . В то же время ГОСТ 5639 (п. 3.3.6) предусматривает оценивать структуру двумя и более номерами в случае, если на исследуемой поверхности шлифа имеются зерна "...отличающиеся от основного (преобладающего) номера, соответствующего определенному эталону шкалы, более чем на 1 номер и занимающую на шлифе площадь более 10%".

Ошибочно по содержанию, т.к. прямой эксперимент обнаруживает значительное расхождение между оценкой одной и той же структуры ТВЭльных

труб  $\varnothing 7 \times 0,3$  мм из стали 026X16H15M3Б сравнением с фотообразцами ГОСТа 5639 и методом измерения длин хорд того же ГОСТа. Результаты оценок, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о значительном расхождении между величиной зерна в одном и том же образце, но определенном различными методами. При этом расхождение тем больше, чем больше разнотерность. Такое расхождение в

оценке по ГОСТ 5639 связано с самым серьезным недостатком этого стандарта, а именно, допущением присутствия в каждом номере минимального и максимального числа зерен соседних номеров, а следовательно, присутствие в каждом номере зерен минимального и максимального диаметров, причем, таким образом, что каждая из этих величин относится одновременно к двум соседним номерам. Например, G6 min одновременно является G7 max и т.д.

Таблица 2

Результаты оценки величины зерна аустенита в металле труб  $\varnothing 7 \times 0,3$  мм из стали 026X16H15M3Б (ЭИ 844БУ-ИД)

Номер образца	по результатам визуальной оценки и значения в соответствии с ГОСТ 5639 Величина зерна	Номер зерна G по ГОСТ 5639-82								Расчетная величина зерна		Коэффициент вариации, $k$
		14	12	10	9	8	7	6	5			
		Значения диаметров, соответствующих предельным значениям, допустимым данным номером								G	$d_L$ , МКМ	
		0,0022... 0,0032	0,0044... 0,0062	0,0088... 0,0125	0,0125... 0,0177	0,0177... 0,0250	0,0250... 0,0354	0,0354... 0,050	0,050... 0,0707			
Относительная доля длин хорд, занимаемых данной размерной группой в %										G	$d_L$ , МКМ	
1	G10, G7	10,8	33,2	24,2	15,1	9,7	6,5	0,5	-	10	10,4	0,7
2	G6, G9	14,6	29,9	27,6	12,9	5,5	7,6	1,9	-	10	10,5	0,8
3	G11, G8	14,0	38,0	31,7	8,6	4,1	3,6	-	-	11	8,3	0,7
4	G11, G8	14,6	42,7	28,6	7,9	3,0	3,0	-	0,2	11	8,0	0,75
5	G11, G8	9,9	38,8	28,4	11,4	6,7	4,4	0,4	-	10	9,4	0,7
6	G11, G8	11,5	28,6	34,0	17,2	5,4	3,1	0,2	-	10	9,6	0,6
7	G11, G9	5,5	49,4	26,8	11,0	3,5	3,8	-	-	11	8,6	0,6
8	G11, G9	6,0	46,6	27,9	7,8	6,8	4,9	-	-	10	9,1	0,7

Известные расчетные методы позволяют измерять величину зерна с меньшей погрешностью. Однако из-за большой трудоемкости на практике их не используют, а применяют исключительно в исследовательских целях, либо в случае рекламации готовых изделий.

Развитие компьютерной техники дает возможность существенно сократить трудоемкость количественных методов оценки зеренной структуры и получать наиболее полную информацию, так как современные компьютеры оснащены программами, обеспечивающими распознавание структуры с металлографического шлифа, получение кривых распределения размеров зерен и расчеты всех параметров исследуемой структуры, что позволяет оценивать разнотерность, а следовательно, однородность структуры готового изделия.

Для разработки соответствующих режимов термической обработки холоднодеформированных изделий, например, труб, используют один из известных методов получения кривых распределения размеров зерен в объеме готового изделия [3]. В качестве исходной информации используют кривые распределения длин хорд или диаметров плоских сечений зерен, полученных на металлографических шлифах после различных режимов термической обработки.

Достаточно подробно эти методы проанализированы и представлены в монографии К.С. Чернявского [4], в которой автор впервые вводит весьма удачное понятие "реконструкция" объемной зеренной структуры по ее плоскому срезу.

Преимущество такой терминологии заключается в том, что самым проблемным вопросом для металловедов является изучение структуры в объеме изделия, которое является непрозрачным телом, а потому все известные методы изучения в объеме сводятся к воспроизведению ее на основании изучения срезов (сечений) непрозрачных тел, что, собственно, и является реконструкцией.

Другим методом изучения объемной структуры металлических изделий является моделирование на прозрачных объектах. Однако все эти методы обладают двумя существенными недостатками: большой трудоемкостью создания моделей и получения на них исходной информации и весьма узкие рамки в части варьируемых размерных параметров исследуемой структуры. Например, у Шайля их не более 10, а у Салтыкова не более 15. Главным же недостатком этих методов является невозможность моделирования полидисперсной разнотельной структуры, поскольку все они разрабатывались для монодисперсной структуры, состоящей из объектов одного размера, например, шара или полиэдров различной формы [5].

С целью разработки режимов термической обработки, обеспечивающей получение требуемой структуры в металле труб-оболочек ТВЭЛ, создан метод компьютерного моделирования параметров зеренной структуры видимой на плоском срезе по заданному распределению зерен в объеме изделия.

В основу метода\* положены два общепринятых в стереометрической металлографии допущения:

- в качестве модели зерен однофазной стали могут служить шары, равновеликие реальным зернам;
- существует функциональная связь между распределением размеров зерен в объеме, на пересекающей этот объем случайной плоскости и на секущей случайной линии в этой плоскости. Первое допущение сделано на основании многочисленных исследований, свидетельствующих о том, что зеренная структура, формирующаяся в процессе собирательной рекристаллизации сталей и сплавов, представляет собой плотноупакованный конгломерат выпуклых кристаллитов, имеющих форму, близкую к одному из представленных на рис. 2 многогранников, которые с достаточной степенью приближения можно заменить равновеликими по объему сферами [3].

Подтверждением этому является и найденная нами аналогия зависимости количества углов в случайных сечениях реальных структур аустенитной (08X18H10T) и ферритной (15X25T) сталей со случайными сечениями пентадодекаэдра.

Для этого было выполнено сечение пентадодекаэдра случайными плоскостями в пределах изменения формы многоугольников от 3-х до 10-ти и по-

строен статистический ряд распределения, характеризующий частоту появления фигур каждого типа.

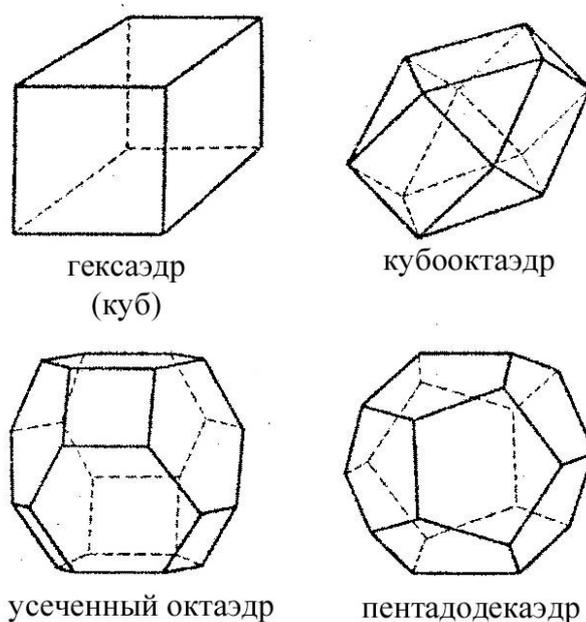


Рис. 2. Возможные формы рекристаллизованных зерен металлических материалов

Для сравнения на рис. 3 нанесены ряды распределения многоугольников, полученные на шлифах аустенитной и ферритной стали. Совпадающий характер распределения, особенно для зерен феррита, дает основание считать пентадодекаэдр адекватной моделью объемного строения металла с выпуклыми равноосными зернами.

Второе допущение проанализировано достаточно подробно в диссертациях [6,7], и на основании сделанного анализа разработан метод реконструкции путем решения системы уравнений, которые позволяют получать вполне корректные результаты в сравнении с известными (рис. 4).



\* В разработке метода принимали участие к.т.н Перчик В.В. и инженер Клюев Д.Ю.

— пентадодекаэдр; — аустенит;  
 ■ — феррит

Рис. 3. Кривые распределения углов в сечениях пентадодекаэдра и реальных структур аустенитной и ферритной сталей

Исследовали десять типов модельных структур с различным распределением в объеме зерен в виде шаров диаметрами от 1 до 20 мм и из шаров одного максимального размера – 20 мм. Количество зерен-шаров в объеме изменяли в пределах от 2,5 до 100%.

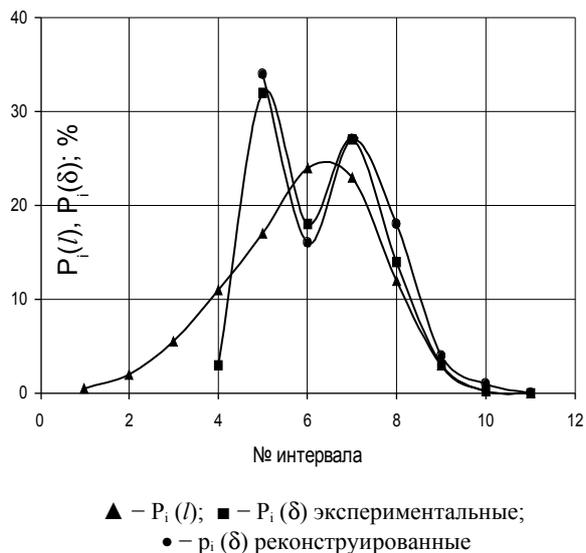


Рис. 4. Распределение размеров плоских сечений зерен, установленные экспериментально и реконструированные в соответствии с разработанным методом

Результаты компьютерной обработки заданных структур приведены в табл. 3.

Анализ вида кривых распределения, а также результатов расчетов позволяет сделать следующие обобщения.

Рассечение объема, состоящего из одинаковых зерен-шаров, случайной плоскостью приводит к появлению зерен-кругов более мелких размеров в количестве примерно 26%, а сечение такой плоскости случайной линией увеличивает разноразмерность до 36%, о чем свидетельствуют коэффициенты вариации, полученные для фигур 1,а; 1,б; 1,в табл. 3. Это согласуется с расчетными данными, приведенными в работах [7, 8].

Аналогичные результаты получены и для нормального распределения, а также для фотоэталонов стандартных шкал ГОСТ 5639 (рис. 5, 6).

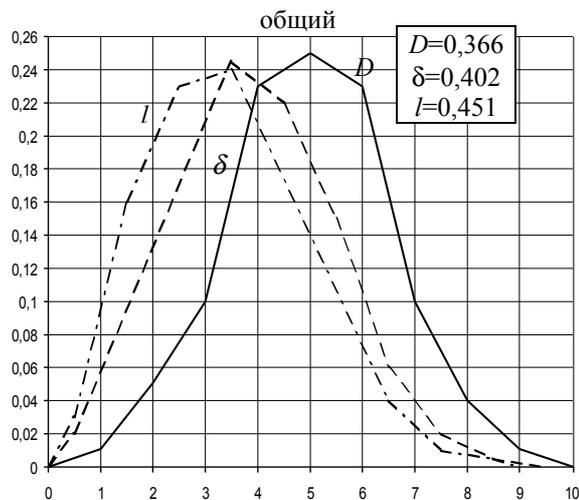


Рис. 5. Распределение моделируемых размеров хорд и плоских сечений от нормального распределения шаров в объеме

Известно, что вид кривой распределения характеризуется несколькими параметрами, в частности, средним значением и коэффициентом вариации, которые дают общее представление о распределении. В нашем случае коэффициент вариации характеризует разноразмерность моделируемой структуры, а вид кривой распределения указывает на преобладающую по величине группу зерен.

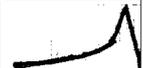
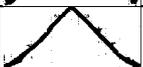
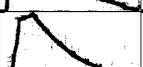
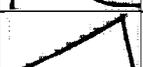
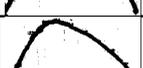
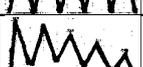
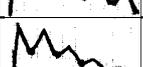
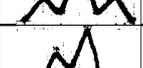
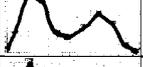
Сопоставление результатов расчетов коэффициентов вариации и вида кривых распределения, приведенных на фигурах 2-7 табл. 3, подтверждают вывод о том, что наиболее полной характеристикой разноразмерности структуры в любом сечении, а следовательно и на шлифе, являются вид кривой распределения и коэффициент вариации. Например, разноразмерность, представленная кривыми (фигуры 2,а; 3,а и 4,а), в числовом выражении одинакова, заданы 9 разных размеров зерен, но различна в количестве зерен различных размерных групп.

Расчеты показали, что максимальная разноразмерность, характеризуемая коэффициентом вариации, соответствует распределению зерен-шаров в объеме, соответствующему приведенным на фигурах 3, 5 и 7, т.е. для кривых, имеющих максимальный разброс диаметров.

Таблица 3

Результаты компьютерной обработки заданных структур

П а р а м е т р ы   р а с п р е д е л е н и я				
Вид кривой	Положение сечения	Среднее значение	Ср. квадратичное отклонение	Коэффициент вариации

Фиг. 1		а	$D$ (объем)	20,0	0	0 (0,34)
		б	$\delta$ (плоскость)	14,5	3,65	0,26 (0,40)
		в	$l$ (линия)	11,8	4,26	0,36 (0,45)
Фиг. 2		а	$D$	9	3,63	0,403
		б	$\delta$	7,767	3,559	0,458
		в	$l$	6,77	3,379	0,499
Фиг. 3		а	$D$	6,308	4,409	0,699
		б	$\delta$	5,531	3,962	0,716
		в	$l$	4,900	3,559	0,726
Фиг. 4		а	$D$	11,69	4,409	0,377
		б	$\delta$	9,915	4,424	0,446
		в	$l$	8,492	4,23	0,449
Фиг. 5		а	$D$	9	5,65	0,62
		б	$\delta$	7,69	5,14	0,67
		в	$l$	6,65	4,64	0,697
Фиг. 6		а	$D$	9	2,607	0,289
		б	$\delta$	7,783	2,845	0,365
		в	$l$	6,798	2,855	0,419
Фиг. 7		а	$D$	9	5,253	0,583
		б	$\delta$	7,734	4,782	0,618
		в	$l$	6,715	4,319	0,643

Примечание: в скобках (фиг. 1) указаны значения для нормального распределения.

При этом распределение, близкое к нормальному, приведенное на фигурах 2 и 6 табл. 3, характеризуется меньшим разбросом и меньшим коэффициентом вариации, что наблюдается на фототалонах ГОСТ 5639 (рис. 6) и в реальных структурах после скоростного нагрева (рис. 7).

Сопоставительный анализ реальных разнородных структур, возникших в результате одновременного протекания собирательной и вторичной рекри-

сталлизации, и модельных разнородных структур свидетельствует о том, что коэффициент вариации зависит не только от размеров зерен, присутствующих в данном объеме, но и от их количества.

Так, например, при одинаковом разбросе значений по величине максимальный коэффициент вариации наблюдается для структуры с большим количеством мелких зерен. Следует отметить, что разработанная методика позволяет исследовать модели не

только в форме шара или пентадодекаэдра, но и модели другого типа и соответственно решать ряд вопросов стереологии.

Рис. 6. Распределение размеров хорд, плоских сечений и объемных размеров для зерна седьмого номера (G7) фотообразца ГОСТ 5639

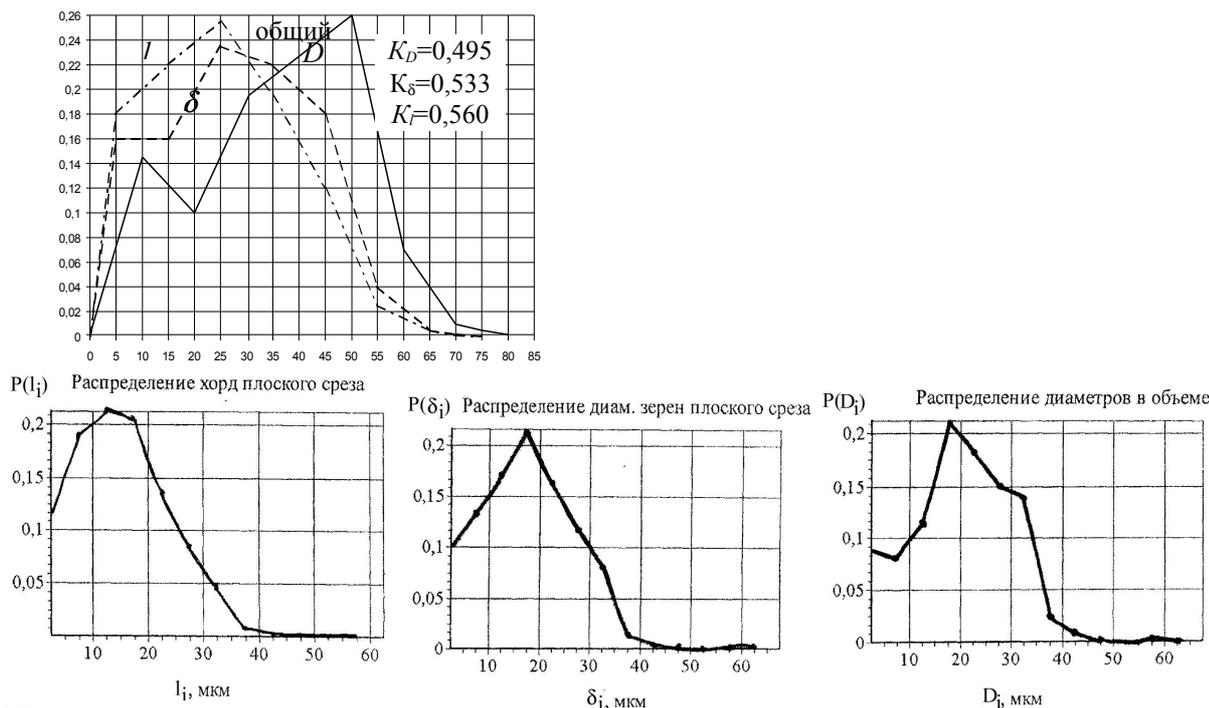


Рис. 7. Распределение размеров хорд, плоских сечений и объемных размеров зерен аустенита стали 08X16H15M3B после скоростного нагрева

Таким образом, полученные результаты указывают на возможность прогнозирования получения той или иной структуры, что позволит более точно разрабатывать режимы термической обработки готовых холоднодеформированных труб специального назначения, к которым предъявляют весьма жесткие требования по структуре и свойствам.

### ЛИТЕРАТУРА

1. М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский. *Структура и механические свойства металлов*. М.: «Металлургия», 1970, 142 с.
2. С.С. Горелик. *Рекристаллизация металлов и сплавов*. М.: «Металлургия», 1978, 568 с.
3. С.А. Салтыков. *Стереометрическая металлография*. М.: «Металлургия», 1970, 376 с.
4. К.С. Чернявский. *Стереология в металловедении*. М.: «Металлургия», 1977, 280 с.

5. F.C. Hull, W.T. Houk. *Transactions AIME //Journal of Metals*. 1953, april, p. 565.

6. Е.Я. Лезинская. *Исследования влияния условий нагрева на рекристаллизационные процессы при термообработке холоднодеформированных нержавеющей и жаропрочных сталей*: Автореф. канд. дис. Днепропетровск, 1972.

7. Т.П. Даниленко. *Оптимизация режимов термообработки осесимметричных труб из аустенитных сталей на основе разработки нового метода определения параметров пространственной зеренной структуры*: Автореф. канд. дис. Днепропетровск, 1988.

8. Т.П. Даниленко, Е.Я. Лезинская и др. *Метод моделирования объемной структуры металлов и сплавов при помощи ЭВМ //Тр. Всесоюз. семинара "Внедрение современных методов контроля структуры и свойств металлопродукции"*. М., 1984, с. 14 – 15.

### ПРОБЛЕМА ОЦІНКИ ЯКОСТІ МЕТАЛА ТРУБ АКТИВНОЇ ЗОНИ АТОМНИХ РЕАКТОРІВ У ПРОЦЕСІ ДОРЕАКТОРНИХ ІСПИТІВ

О.Я. Лезинська, Т.М. Буряк

Виконано аналіз стандартних методів оцінки одного з основних показників якості металу – зерненої структури аустенітних сталей та сплавів на основі цирконію і титану, що використовуються як конструкційні матеріали активної зони атомних реакторів. Показано неадекватність стандартних методів оцінки розмірів зерна в реальних виробках. Запропоновано метод комп'ютерного моделювання зерненої структури труб-оболонки ТВЕЛ і ТВЗ при розробці режимів термічної обробки.

### PROBLEMS OF EVALUATION OF NUCLEAR REACTOR ACTIVE ZONE TUBES DURING PRE-IRRADIATION TESTS

P (D)

***E.J. Lesinskaya, T.N. Buriak***

An analysis of standard methods of grain size estimation of basic indexes of austenitic steel and alloys of active area of atomic reactors. It is shown insolvency of standard methods of grain size estimation in the real wares. The suggested method of computer simulation of structures of pipes-shells raperd for working aut of modes of heat treatment.