



## РАЗРУШЕНИЕ СВАРНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ТРУБ

К. Дж. МИЛЛЕР (Шеффилдский ун-т, Великобритания)

Приведены результаты исследований причин разрушения труб из алюминиевого сплава 6061-T6, полученных пресованием. Используются всесторонние подходы, учитывающие особенности процесса производства, трехмерный анализ напряжений, механику разрушения, микроструктуру и пр. Даны рекомендации по предупреждению разрушений.

*Ключевые слова:* микроструктурная механика разрушения, остаточные напряжения, периферические крупные зерна, способ выдавливания через многоканальные матрицы, методы анализа усталостного разрушения

Ролик цилиндрического сечения (рис. 1) используется в системах ленточных конвейеров, обеспечивающих непрерывную транспортировку угля из открытых горных разработок, удаленных от моря и расположенных на расстоянии нескольких миль к пункту выгрузки у океана, где один или два корабля могут загружаться непрерывно. Расстояние между роликами в ленточном конвейере составляет 1,5 м, а уголь транспортируется по резиновым композитным лентам таким образом, чтобы равномерно распределенная нагрузка 718 кг (3,52 кН) перемещалась вдоль конвейера по ширине ролика. Эта нагрузка может возрастать в 5 раз на верхней периферийной поверхности ролика. Концевые заглушки облегчают смазывание подшипников, необходимое для предотвращения заедания роликов, вращающихся со скоростью 602 об/мин, т. е. ролик диаметром 152,4 мм поддерживает скорость перемещения ленты 4,8 м/с. В некоторых случаях на один оборот приходится четыре цикла нагружения, что обеспечивает 3,4 млн циклов за каждый день непрерывного

движения. К сожалению, протоколы о свойствах материала, позволяющие иметь информацию о десятилетнем сроке службы роликов, отсутствуют.

Несмотря на всестороннюю удовлетворительную оценку до внедрения на месте, изделие зачастую разрушалось через несколько дней после установки. Плоскость растрескивания проходила по плоскости  $r-z$ , а не  $r-\theta$ , в которой существовало осевое растягивающее напряжение вследствие прогиба ролика. Некоторые трещины располагались несколько зигзагообразно вдоль оси направления их роста, тогда как другие лишь слегка изгибались. На концевых фитингах (заглушках), закрепленных неподвижно, трещины не зарождались. Многие трещины были широко открыты, чему способствовало влияние остаточных напряжений. В этом случае совершенно очевидна необходимость применения анализа методом конечных элементов.

Показана возможность проведения статистического анализа разрушений за день, неделю или месяц, поскольку поведение материала при длительных нагрузках, вызывающих усталость, часто рассматривается как статистический феномен Вейбулла. Но этот анализ не был применен, так как он не объяснил бы физических причин мно-

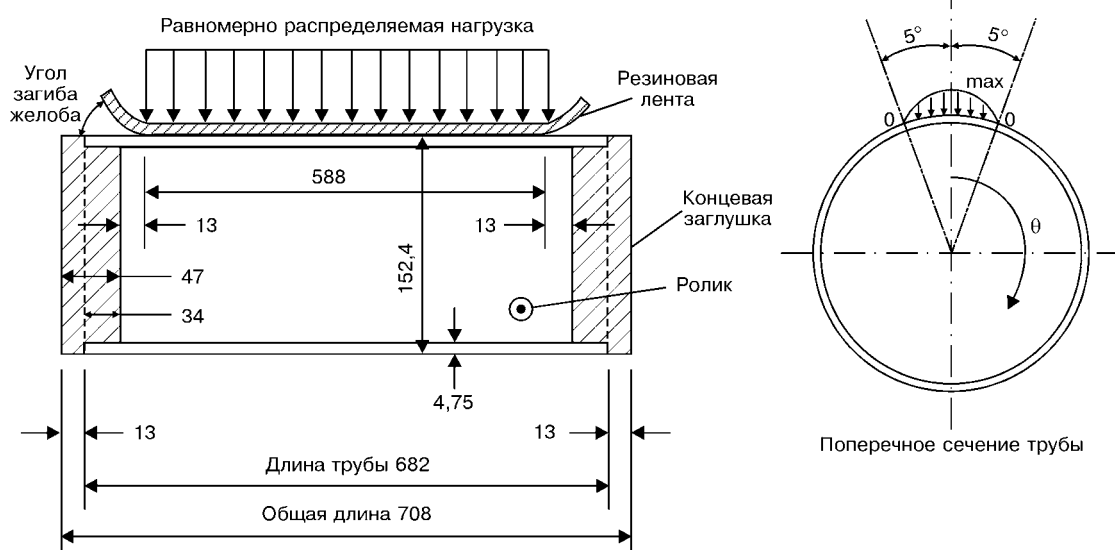


Рис. 1. Цилиндрический ролик



Таблица 1. Основные результаты анализа методом конечных элементов

Объект исследования	Напряжения, МПа					
	касательные по окружности (растягивающие от центробежных сил)			осевые		
	$\sigma_{\min}$	$\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma$	$\sigma_{\min}$	$\sigma_{\max}$	$\Delta\sigma$
Внешняя оболочка:						
большой цикл	-45,6	18,6	64,2	-28,4	11,2	39,6
малый цикл	-12,1	18,6	30,7	-3,2	11,2	14,4
Внутренняя оболочка:						
большой цикл	-18,7	45,5	64,2	-8,1	6,0	14,1
малый цикл	-18,7	12,5	31,2	-8,1	5,1	13,2

гочисленных и почти мгновенных разрушений. Химический состав и механические свойства данного материала соответствовали техническим требованиям. Учитывались два возможных фактора влияния окружающей среды: непосредственная близость моря и присутствие мелких черных частиц, которые в соединении с соляными испарениями могли вызвать коррозионное разрушение.

**Анализ методом конечных элементов.** Благодаря симметрии поперечного сечения ролика был проанализирован только сегмент, половина окружности ролика и половина длины ролика. На рис. 2 показаны трехмерные контуры одного из исследуемых параметров.

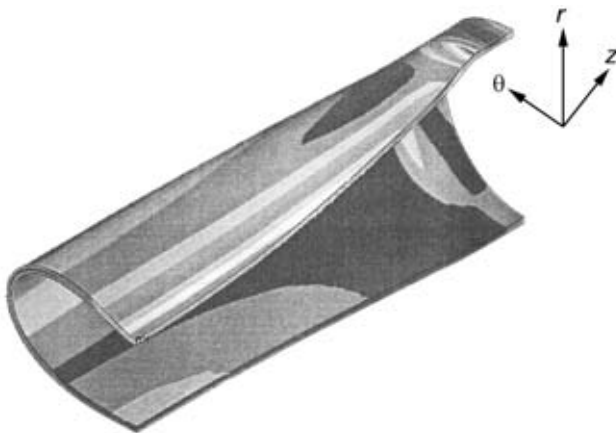


Рис. 2. Эквивалентное трехмерное распределение напряжений фон Мизеса

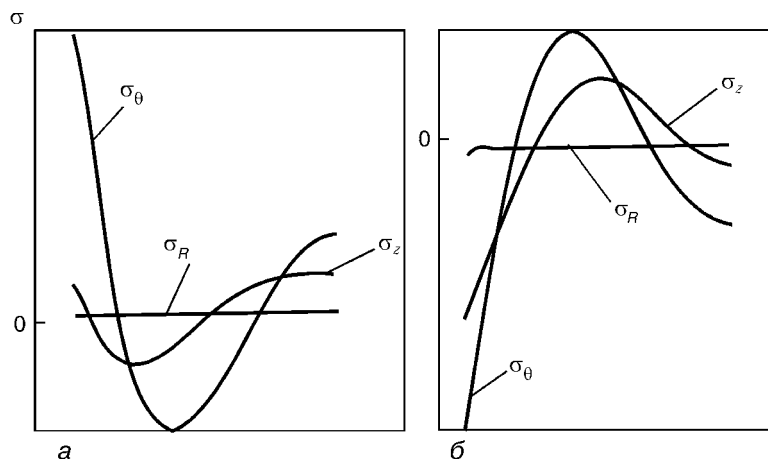


Рис. 3. Характер распределения растягивающих напряжений от центробежных сил  $\sigma_\theta$ , осевых  $\sigma_z$  и радиальных  $\sigma_R$  по наружной (а) и внутренней (б) поверхности половины окружности ролика; значения см. табл. 1

дованных параметров. Зарегистрированы пространственные смещения, а также максимальные/минимальные главные напряжения, включая радиальное, осевое и касательное по окружности. Решение методом конечных элементов получено с помощью версии 6.1 программы ANSYS с использованием метода Н-элементов. Отображенная сетка из четырехугольников обеспечивает более точные результаты по сравнению с треугольниками или комбинацией треугольников и четырехугольников. Приложенная нагрузка составляла 1760,35 Н, т. е. половину

718 кг. Закрепленный конец ролика имел соединительную муфту, которая обеспечивала легко поддерживаемый режим на конечном отрезке 34 мм половины цилиндра. Для упрощения нагрузки на ленту конвейера вследствие давления было принято треугольное распределение давления.

На рис. 3 показаны основные результаты, а в табл. 1 представлены численные данные. Основные выводы, сделанные в результате анализа, таковы:

- уровни циклических напряжений низкие, а усталостные разрушения не зафиксированы;

- поскольку цилиндр вращается на 360°, то его внешняя и внутренняя поверхности подвергаются двум различным циклам вращения (большому и малому). Это явление происходит при распределении как касательных напряжений по окружности, так и осевых напряжений, при этом первые имеют большую важность по сравнению с осевыми напряжениями, вызванными вращательным изгибом;

- радиальные напряжения можно не принимать в расчет;

- поверхности, на которых возможно зарождение трещин, находятся под действием двухосного напряженного состояния;

- разрушения возникают вследствие какой-то другой главной причины или нескольких причин.

**Процесс прессования выдавливанием.** Алюминий поддается прессованию, поэтому ему можно придавать множество форм. На рис. 4 показаны

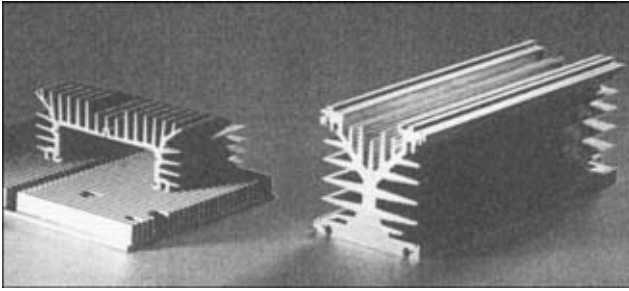


Рис. 4. Образцы, полученные прессованием

два примера того, как теплопроводность алюминия может быть использована в системах охлаждения благодаря выполнению оптимальных, но сложных поперечных сечений. Существует три основных способа изготовления продукции прессованием:

*бесшовное прессование металла прямым способом.* В данном случае предварительно нагретая заготовка проталкивается через матрицу и, следовательно, она должна скользить вдоль внутренней стенки контейнера. Для преодоления силы трения необходимо применять высокие давления. Задняя часть заготовки, т. е. приблизительно 15 %, должна быть удалена во избежание образования дефектов различных форм в прессованном профиле;

*бесшовное прессование металла непрямым способом.* В этом случае с относительной скоростью матрицу с полым пресс-штемпелем проталкивают в стационарную заготовку, и продукт втекает внутрь штемпеля, нагрузка от сил трения значительно уменьшается, по сравнению с прямым способом, поэтому этот способ предпочтительнее для твердых алюминиевых сплавов 2024 и 7075;

*способ выдавливания через многоканальные матрицы.* Это более быстрый и недорогой способ, поэтому является предпочтительным для некритических применений и более мягких сплавов. Он был использован при изготовлении тонкостенных цилиндров для роликов в случае, обсуждаемом в данной статье.

На рис. 5 показано, как сплошная цилиндрическая заготовка приближается к матрице. Перемычка в матрице предназначена для разделения заготовки на две половины, которые проходят через оправку установленного наружного диаметра, равного диаметру будущего отверстия трубы. При прохождении двух половин через отверстие в матрице, соответствующее наружному диаметру трубы, две половины заготовки соединяются посредством сварки давлением. Таким образом, конечный продукт имеет два диаметрально противоположных шва. В зависимости от размера и толщины изготавливаемой трубы матрица может иметь три (или пять) перемычки, расположенные на одинаковом расстоянии друг от друга и разделяющих поступающие сплошные заготовки на три (или пять) сегмента. Поэтому труба, полученная прессованием, будет иметь три (или пять) зоны сварных швов, расположенных на одинаковом расстоянии по окружности трубы.

В процессе прессования через отверстие могут возникать дефекты различных форм. Свариваемые

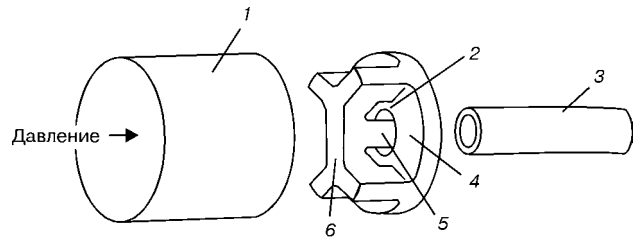


Рис. 5. Система камерной матрицы с двумя каналами и сварочными камерами: 1 — сплошная заготовка; 2 — зона сварного шва; 3 — труба, полученная выдавливанием; 4 — матрица; 5 — выступ оправки; 6 — перемычка

поверхности необходимо тщательно очищать. Наиболее распространенными загрязнениями являются коллоидальный графит или нитрид бора, используемые для отделения алюминиевой заготовки от стальных элементов матрицы. Швы с загрязнениями могут способствовать расщеплению трубы.

Другим известным дефектом является дефект поперечного шва, образующийся на границе раздела между заготовкой, входящей в матрицу, и последующей заготовкой. При прессовании эта граница является критической зоной, где возможно возникновение дефектов сварного шва. Если режимы прессования (скорость, температуру, перепады давления и геометрию матрицы) не оптимизировать, может образоваться периферийная крупнозернистая структура.

#### Процессы, происходящие после прессования.

После извлечения из матрицы горячую трубу для придания ей максимальной прочности подвергают термической обработке на твердый раствор, а затем немедленному искусственному старению. Однако конечные свойства продукта во многом зависят от формы горячего металла после извлечения его из штампа. В случае, если в процессе прессования возникли дефекты и/или были допущены ошибки, тонкий длинный цилиндр круглого сечения может деформироваться в цилиндр с овальным поперечным сечением. Если это происходит, деформированные цилиндры можно подвергнуть правке в валах. В процессе правки деформированные по спирали цилиндры с центрированным стержнем круглого сечения, что обеспечивает необходимую конечную форму. К сожалению, процесс правки в валах может вызвать остаточные напряжения и царапины на поверхности.

*Остаточные напряжения.* Как отмечено ранее, на поврежденных роликах обнаружены открытые трещины, расположенные вдоль оси, свидетельствующие о наличии остаточных напряжений. Исследовано несколько образцов, которые подвергали правке в валах. Касательные и осевые напряжения на внутренней и наружной окружностях определяли с помощью 17 розеток тензодатчиков, расположенных под углом 90°, до и после выполнения надреза вокруг каждого датчика.

Максимальные значения касательных напряжений на наружной и внутренней поверхностях составили соответственно 127 и -149 МПа, а осевых — соответственно 38 и -49 МПа. Критическим значением является 127 МПа, но поскольку оно



Таблица 2. Значения усталостного напряжения четырех циклов за один оборот цилиндра

Цикл	Растягивающее остаточное напряжение, МПа			
	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma$	$R (\sigma_{min}/\sigma_{max})$
Большой:				
127	145,6	81,4	64,2	0,56
103	121,6	57,4	64,2	0,47
Малый:				
127	145,6	114,9	30,7	0,79
103	121,6	90,9	30,7	0,75

зафиксировано только на одном образце, то на цилиндрах, подвергаемых наиболее сильной правке в валках, вероятны намного более высокие значения. Кроме того, другой пик (103 МПа) зарегистрирован для касательных напряжений на наружной поверхности, при этом он был смещен от значения 127 МПа на  $216^\circ$ . Заметим, что равноотстоящие зоны сварных швов расположены на  $0, 72, 144, 216$  и  $288^\circ$ .

**Влияние средних напряжений.** Остаточные напряжения обуславливают очень высокое среднее напряжение, к которому следует добавить менее высокие усталостные (циклические) напряжения. В табл. 2 приведены эти данные, включающие самое высокое (127 МПа) и самое низкое (103 МПа) значения растягивающих остаточных напряжений, полученных ранее. Рассматриваются только поверхностные касательные напряжения по окружности, поскольку они являются нормальными для плоскости трещины при разрыве. Из этого следует, что два стационарных пика растягивающих остаточных напряжений (большой и меньший, отстоящие друг от друга на  $216^\circ$ ) комбинируются с двумя (большим и малым) диапазонами циклических усталостных напряжений, обуславливая таким образом четыре усталостных цикла за один оборот цилиндра. В табл. 2 приведены также значения коэффициента  $R(\sigma_{min}/\sigma_{max})$ , связанные с каждым из четырех циклов за один оборот.

Диаграмма Гудмена–Содерберга, на которой показан диапазон циклических напряжений  $\Delta\sigma$  в зависимости от среднего напряжения  $\sigma_{cp}$  для данной циклической долговечности, иллюстрирует вы-

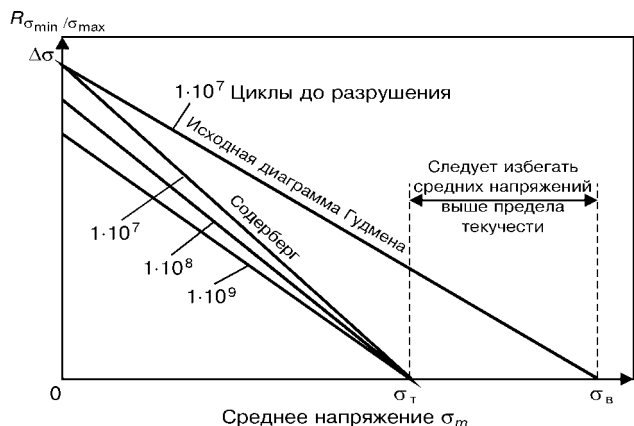


Рис. 6. Диаграмма Гудмена–Содерберга

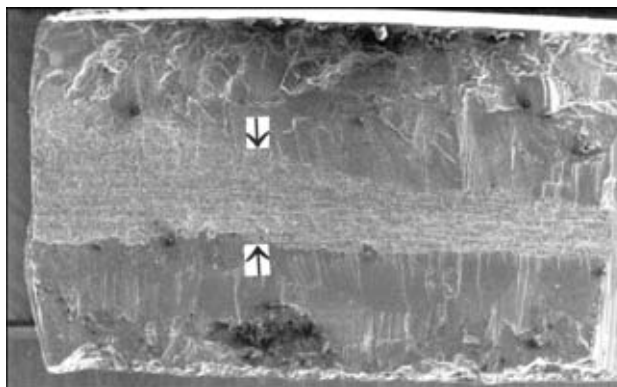


Рис. 7. Участок поверхности разрушения стенки цилиндра толщиной 4,75 мм

сокую чувствительность к значениям  $\Delta\sigma$  при длительной усталости, когда среднее (остаточное) напряжение приближается к пределу текучести материала. Это касается обычных (без трещин) образцов (рис. 6). Высокие положительные значения коэффициента  $R (\sigma_{min}/\sigma_{max})$  обуславливают очень низкие (пороговые) значения  $\Delta\sigma$  при расчете линейной механики упругих разрушений для трещин, развивающихся вследствие усталости. На рис. 7 показано разрушение на поверхности цилиндра.

**Фрактография и аспекты микроструктуры.** На рис. 7 и 8, являющихся взаимодополняющими, изображены соответственно стенка цилиндра толщиной 4,75 мм, которая является плоскостью разрушения, и периферийная крупнозернистая структура наружной и внутренней поверхностей цилиндра. Стрелки на рис. 7 обозначают границу зоны усталостного разрушения, ширина которой очень мала. Зоны на наружной и внутренней поверхностях имеют фасетки сколов, что свидетельствует о быстром разделении металла вследствие разрушения в этом предположительно пластичном металле. На рис. 8 показаны поверхностная крупно- и мелкозернистая внутренняя структуры; при этом последняя обеспечивает ограниченную зону, отличающуюся прекрасной усталостной прочностью и высоким пределом текучести, типичным для сплава 6061-Т6. Наружная зона имеет незначительный предел текучести в соответствии с отношением Холла–Петча, которое связывает предел текучести с обратным значением квадратного

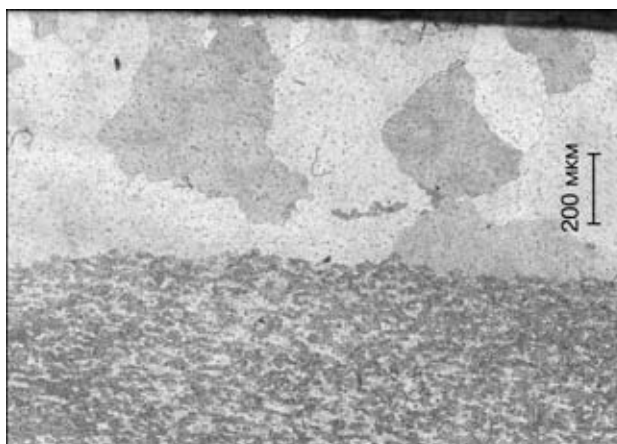


Рис. 8. Микроструктура металла стенки цилиндра

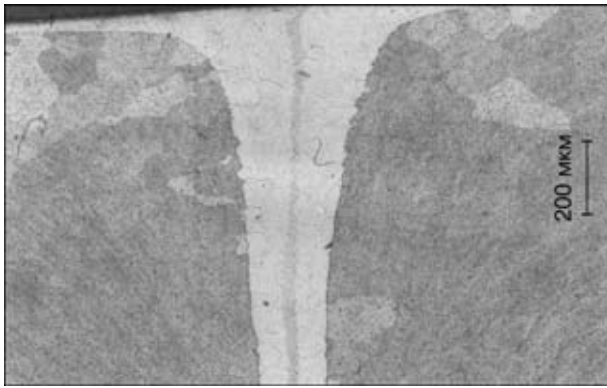


Рис. 9. Поперечное сечение зоны сварного шва с минимальной толщиной 200 мкм приблизительно на 1,8 мм ниже наружной поверхности

корня размера зерна, т. е.  $\sigma_T = k(1\sqrt{d})$ . Поскольку все металлы растрескиваются, если их зерна будут сжиматься вследствие пластической деформации, на зону периферийной крупнозернистой структуры с низким пределом текучести будет оказывать влияние поле растягивающего двухосного напряжения ниже предела упругости. При этом наружные зерна подвергаются воздействию глубоких трещин скола поперек целых зерен, которые часто имеют размер более 1,5 мм. Если же середина цилиндра растрескалась вследствие усталости, оставшаяся часть будет быстро разрушиться.

Одна из зон сварного шва с большим увеличением показана на рис. 9. На поверхности контакта видны крупные зерна между свариваемыми деталями и мелкозернистая структура ниже поверхности и вблизи зоны сварного шва. На окружности цилиндра могут располагаться пять таких зон. Высока вероятность того, что периферийная крупнозернистая структура растрескивалась в процессе правки в валках и до того, как ролики подверглись воздействию циклических сил.

**Микроструктурная механика разрушения.** Она имеет три основных принципа:

трещины развиваются под действием циклического нагружения;

скорость развития начальной трещины пропорциональна размеру зерна (или обратному значению предела текучести), что обуславливает степень пластичности в вершине трещины;

развитие усталостных трещин замедляется, когда они приближаются к барьерам, создаваемым микроструктурой, например к границам зерен. В уравнении механики разрушения микроструктуры

$$da/dN = C\Delta\sigma^m(d - a),$$

где  $da/dN$  — циклическая скорость развития трещины;  $C$  и  $m$  — константы материала;  $\Delta\sigma$  — диапазон циклических напряжений;  $d$  — размер зерна;  $a$  — длина трещины внутри зерна. Отсюда следует, что чем больше зерно, тем быстрее растет начальная трещина. При очень высоких уровнях напряжения трещина будет расти намного быстрее. Кроме того, поскольку уровни напряжения выше, чем одна треть предела текучести материала, линейная механика упругих разрушений не принимается во внимание, должна быть рассмотрена механика

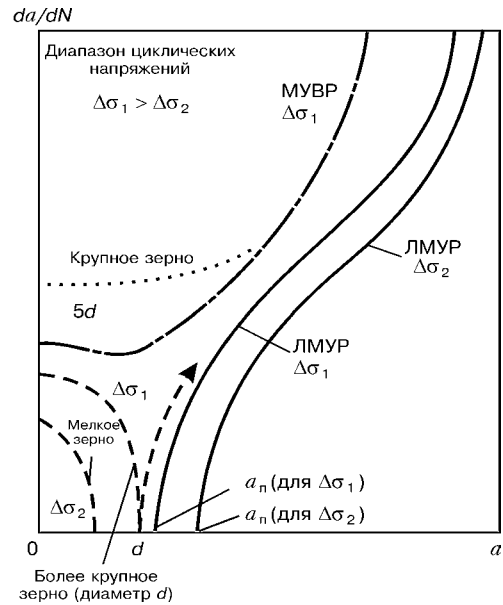


Рис. 10. Отношение между микроструктурой, механикой упруговязких разрушений (МУВР) и линейной механикой упругих разрушений (ЛМУР) при различных диапазонах циклических напряжений, длине трещин и размерах зерен

упруговязких разрушений. В условиях максимальных значений напряжений (табл. 2) и крупнозернистой структуры, если все поверхностные зерна не разрушатся в процессе правки, то трещина вырастет поперек поверхностных зерен в течение первого же дня эксплуатации, когда будет накоплено не менее 3 млн циклов. В средней четверти стенки трубы ограниченную усталостную прочность необходимо идентифицировать с использованием принципов механики упруговязких разрушений. Поэтому пороговые условия, соответствующие принципам линейной механики упругих разрушений, не подходят для решения этой проблемы. Рис. 10 иллюстрирует краткое изложение этого положения.

**Влияние окружающей среды.** Питтинговая и межкристаллитная коррозия обнаружена на поверхностях некоторых разрушений. Следовало установить, способствовала ли такая коррозия процессу начального разрушения или же она появилась после того, как поверхностные зерна растрескались вследствие правки. Поскольку коррозионные процессы не протекают в указанном алюминиевом сплаве, используемом в океанской среде, то такая возможность не рассматривалась как вопрос первостепенной важности. Однако способы EDS и SEM были применены к поверхности продукта. Кроме того, выполнен анализ спектров комбинационного рассеяния на образце черных частиц, взятом с поверхности излома, а также на образце порошкообразного угля. Окончательный ответ не получен, но образец черных частиц был, по всей вероятности, графитом, используемым для покрытия заготовок перед прессованием. Угольная пыль попадает во все открытые трещины и благодаря своему сопротивлению сжатию, в отличие от графита, закрепляет открытые трещины, тем самым увеличивая сопротивление распространению



усталостных трещин. Однако главный аспект разрушений заключается в том, что процессы, зависящие от времени, например коррозионная усталость и коррозия под напряжением, оказывают незначительное влияние, поскольку большинство разрушений происходило вскоре после установки цилиндров.

### Выводы

1. Установлено, что процесс правки, следующий за прессованием, обуславливает очень высокие остаточные напряжения. Уменьшение предела текучести ниже уровня, предписываемого международными нормами, является следствием крупных поверхностных зерен.

2. Показано образование периферийной крупнозернистой структуры вследствие недостаточной пластической деформации поверхностного материала в процессе прессования. Деформация выше предела текучести, но ниже критического уровня не создает предпосылки для интенсивного образования зародков зерен, что позволило бы приобрести достаточную прочность и сопротивление усталости. Рекристаллизация и рост зерен при высокой температуре происходит за счет нескольких центров образования зародышей, которые существуют в зоне сварного шва во время последующего прессования, но исчезают при правке.

3. Установлена возможность предотвращения разрушений путем внедрения систем контроля ка-

чества в процессе производства, включая испытание на раздачу сварной трубы на произвольно выбранных образцах. Для этого пробивной инструмент конической формы впрессовывается в отверстие цилиндра, что при наличии слабых зон вызовет расщепление цилиндра.

4. Показано, что ролики ленточного конвейера могут накапливать 20 млн циклов в первую неделю эксплуатации. В литературе нет данных о разрушениях при длительной усталости для этого алюминиевого сплава.

5. Микроструктурная механика разрушения объясняет растрескивание поверхности в зоне периферийной крупнозернистой структуры. Высокие напряжения при растяжении по двум осям обуславливают поперечное сжатие, которое способствует возникновению глубоких хрупких трещин.

6. Зона усталостного разрушения в средней четверти толщины стенки достаточно небольшая, и усталостная прочность сплава 6061-T6 из-за наличия зон периферийной крупнозернистой структуры была строго обусловлена перед введением в эксплуатацию.

7. Методы анализа линейной механики упругих разрушений, особенно включающие пороговые значения, не подходят для анализа таких разрушений.

Given are the results of investigations of the causes for failure of pipes of aluminum alloy 6061-T6, produced by extrusion. Comprehensive approaches were used, allowing for the features of the production process, three-dimensional stress analysis, fracture mechanics, microstructure and others. Recommendations on fracture prevention are given.

Поступила в редакцию 22.09.2003