

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА ЗЕРЕН МАТЕРИАЛА НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ОБРАЗЦОВ ИЗ ЛИСТА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16Т ПРИ РЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ

Как известно, механизм процесса усталостного разрушения металлов [1] неразрывно связан со структурной неоднородностью, заключающейся в случайных вариациях размеров и очертаний отдельных зерен металла, направлений их кристаллографических плоскостей, в наличии различных фаз, включений, дефектов кристаллической решетки.

Этот факт отмечен еще в классической работе Хейвуда [2], а также позднее в работах [1, 3,] и многих других. В частности, в работе [3] указывалось, что рассеяние результатов испытаний на выносливость возникает также вследствие влияния факторов, связанных со статистической природой усталостного разрушения. К таким факторам относятся микроскопические источники рассеяния долговечности, связанные с макро- и микроструктурной неоднородностью металла: разные размеры, форма и ориентировка зерен, наличие различных структурных фаз. В работе [4] отмечено, что рассеяние усталостных характеристик увеличивается за счет неоднородности структуры полуфабрикатов в связи с колебаниями состава, режимов плавки.

Еще в 70-е годы XX века в результате крупномасштабных исследований долговечности различных стандартных образцов материалов и элементов авиационных конструкций, проводимых сотрудниками ЦАГИ и ведущих КБ, была обнаружена существенная зависимость долговечности от вида полуфабриката и его параметров, например толщины и поставки материала. Так, для одного из основных авиационных конструктивных алюминиевых сплавов Д16Т было установлено, что для разных поставок и толщины листов долговечность может различаться в 1,5 – 2 раза, а иногда и более [5] (рис. 1).

Однако этот вопрос не был достаточно подробно исследован, поскольку доминирующая на тот момент концепция безопасной эксплуатации была направлена на то, чтобы не допускать возникновения усталостных трещин в течение всей эксплуатации самолета, что приводило к значительным коэффициентам запаса прочности, закладываемым при проектировании конструкции. Переход на концепцию безопасного повреждения, предполагающую контролируемое развитие усталостных трещин, вызвал необходимость существенно повысить точность прогнозирования долговечности, т. е. необходимость значительно более точно знать усталостные свойства конструкции и материала.

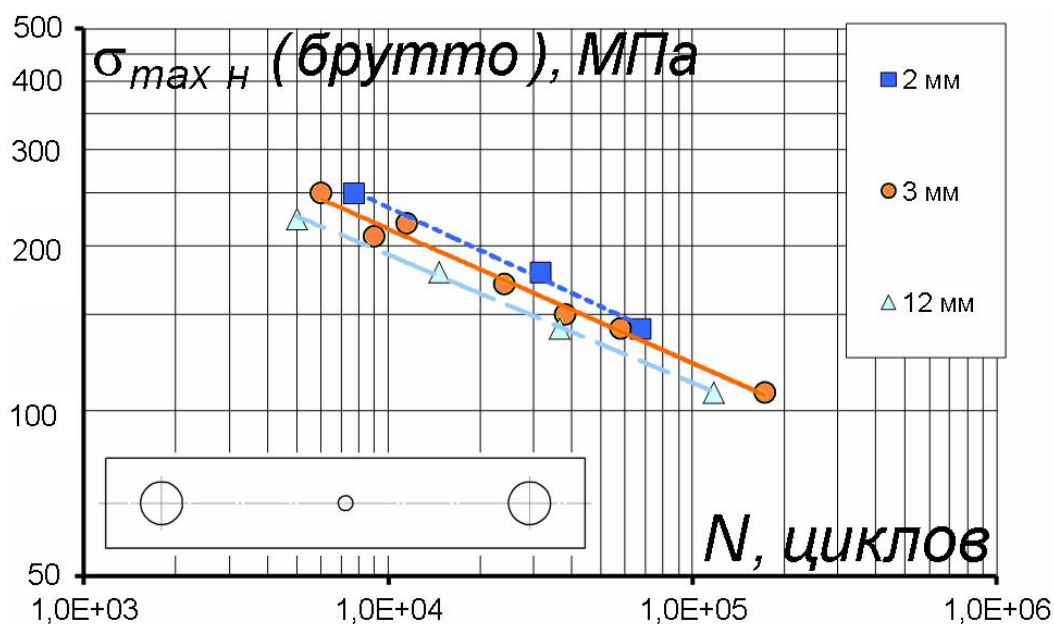


Рисунок 1 – Кривые усталости стандартных образцов ($B/d = 6$) из Д16Т при отнулевом регулярном нагружении, полученные в ЦАГИ [5]

Необходимость установить связь между структурными характеристиками материала и его усталостными свойствами также вызвана развитием более точного метода расчета долговечности – по локальному напряженно-деформированному состоянию, использующего в качестве исходных данных свойства материала, а не элемента конструкции.

Важно подчеркнуть, что указанные выше разбросы усталостных свойств в зависимости от толщины листа и поставки обусловлены именно отличием характеристик материала, а не разницей в качестве изготовления отверстий в разнообразных партиях образцов. Подтверждением этого является то, что данный эффект обнаружен и при испытаниях гладких образцов из сплава Д16Т.

На рис. 2, 3 показаны результаты усталостных испытаний гладких образцов из листов сплава Д16Т разной толщины при симметричном и асимметричном регулярном нагружении. Испытания образцов и обработка результатов для листа толщиной 6 мм проведены совместно с н.с. А.А. Черных [6], толщиной 8 мм – с м.н.с. А.В. Заруцким, толщиной 2 мм – с м.н.с. Р.Ю. Решетниковой [7], толщиной 5 мм – проведены м.н.с. С.Ф. Мандзюком [8] (сотрудниками ПНИЛ «Прочность» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»).

Установлено, что листы из одного и того же материала одной термообработки, но разной толщины имеют различную усталостную долговечность.

Причем это отличие долговечности (до двух раз и более) значительно увеличивается с понижением действующих напряжений.

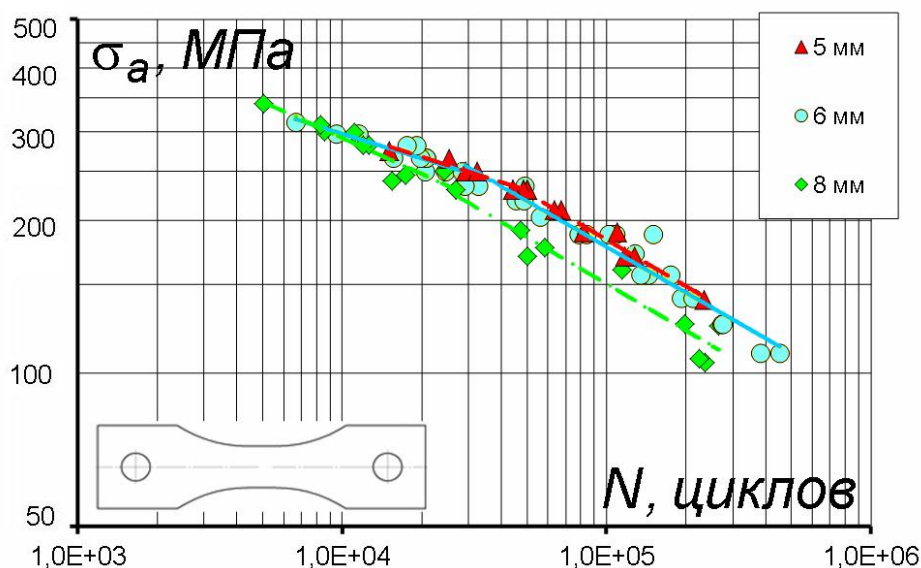


Рисунок 2 – Кривые усталости листов разной толщины материала Д16Т при симметричном регулярном нагружении

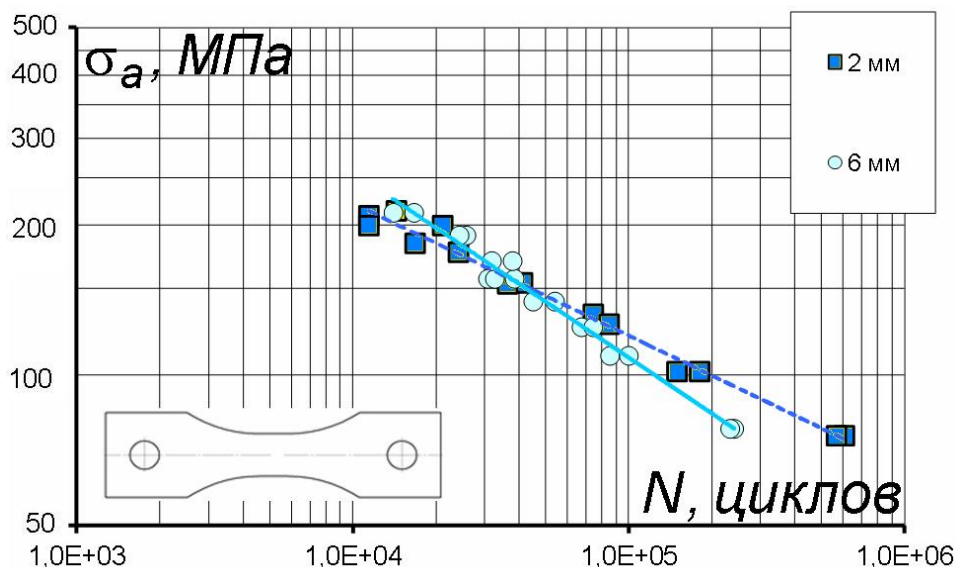


Рисунок 3 – Кривые усталости листов разной толщины материала Д16Т при асимметричном регулярном нагружении ($\sigma_m = 200$ МПа)

Последние исследования (например, [9]) показывают, что усталостная прочность цветных сплавов в многоциклового области зависит, прежде всего, от дислокационной субструктуры, размера зерен и их ориентации.

Поэтому для установления причины описанного выше явления проведен сравнительный анализ химического состава и структуры листов из сплава Д16Т – формы и размера зерен. Их определение выполнено на растровом электронном микроскопе лаборатории электронной микроскопии (ЛЭМ) Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» с помощью научного сотрудника С.Л. Абашина.

В качестве исследуемого параметра, характеризующего структуру материала, принят средний размер зерен. Используются листы из сплава Д16Т толщиной 2, 5, 6 и 8 мм.

Исследование химического состава материала

Полученный химический состав листов сопоставлен с требуемым ГОСТ 4784-97 [10]. В табл. 1 представлено содержание массовой доли химических элементов в материале Д16Т согласно [10] и по результатам, полученным в ЛЭМ.

Таблица 1 – Массовая доля химических элементов в материале Д16Т

Элемент	ГОСТ 4784-97	Исследованные листы			
		2 мм	5 мм	6 мм	8 мм
Содержание элементов, %					
Al	<93,0	91,81	91,65	91,50	92,13
Cu	3,8...4,9	4,69	4,93	4,80	4,56
Mg	1,2...1,8	1,64	1,55	1,50	1,61
Si	<0,5	0,30	0,35	0,30	0,35
Mn	0,3...0,9	0,52	0,64	0,50	0,52
Fe	<0,5	0,42	0,36	0,40	0,39
Zn	<0,3	0,06	0,10	0,20	0,17

Установлено, что химический состав всех образцов соответствует требованиям ГОСТ. Превышение содержания меди на 0,03% для листа толщиной 5 мм можно отнести к погрешности измерения. Изменение массовой доли элементов в зависимости от листа незначительно и не может заметно влиять на долговечность.

Определение величины зерен материала

Образцы для определения крупнокристаллической структуры зерна изготовлены согласно ГОСТ 21073.0-75 [11] – отшлифованы и отполированы. Методы определения величины зерен регламентированы в ГОСТе [12-15]. Из-за недостаточной точности методов не использованы ГОСТы [13,14], в которых предполагается, что форма зерна близка к круглой. Как будет показано далее, в исследуемом материале значительная часть зерен имеет явно продолговатую форму, поэтому определение величины зерна материала согласно этим ГОСТам приводит к существенной погрешности.

Величины размеров зерен определены тремя способами:

- первый способ – согласно [12] (применяют в промышленности);

– второй способ – согласно [15] (используют в научно-исследовательских работах, и он является наиболее точным из стандартных);

– третий способ – измерение конкретных зерен (применен не только для получения среднего размера, но и анализа всей совокупности размеров зерен, содержащихся в структуре сплава).

Для третьего способа проведена обработка фотографий, полученных с помощью растрового электронного микроскопа (рис. 4, а). Измерения выполнены для зерен с четко заметным контуром (рис. 4, б). При этом фиксировалась длина (расстояние между наиболее удаленными точками контура зерна) и ширина (наибольшее расстояние между точками контура, лежащими на линиях, перпендикулярных длине). Средний размер зерен для каждого листа найден как среднее арифметическое размеров примерно двухсот зерен в двух-трех различных местах на каждом образце материала.

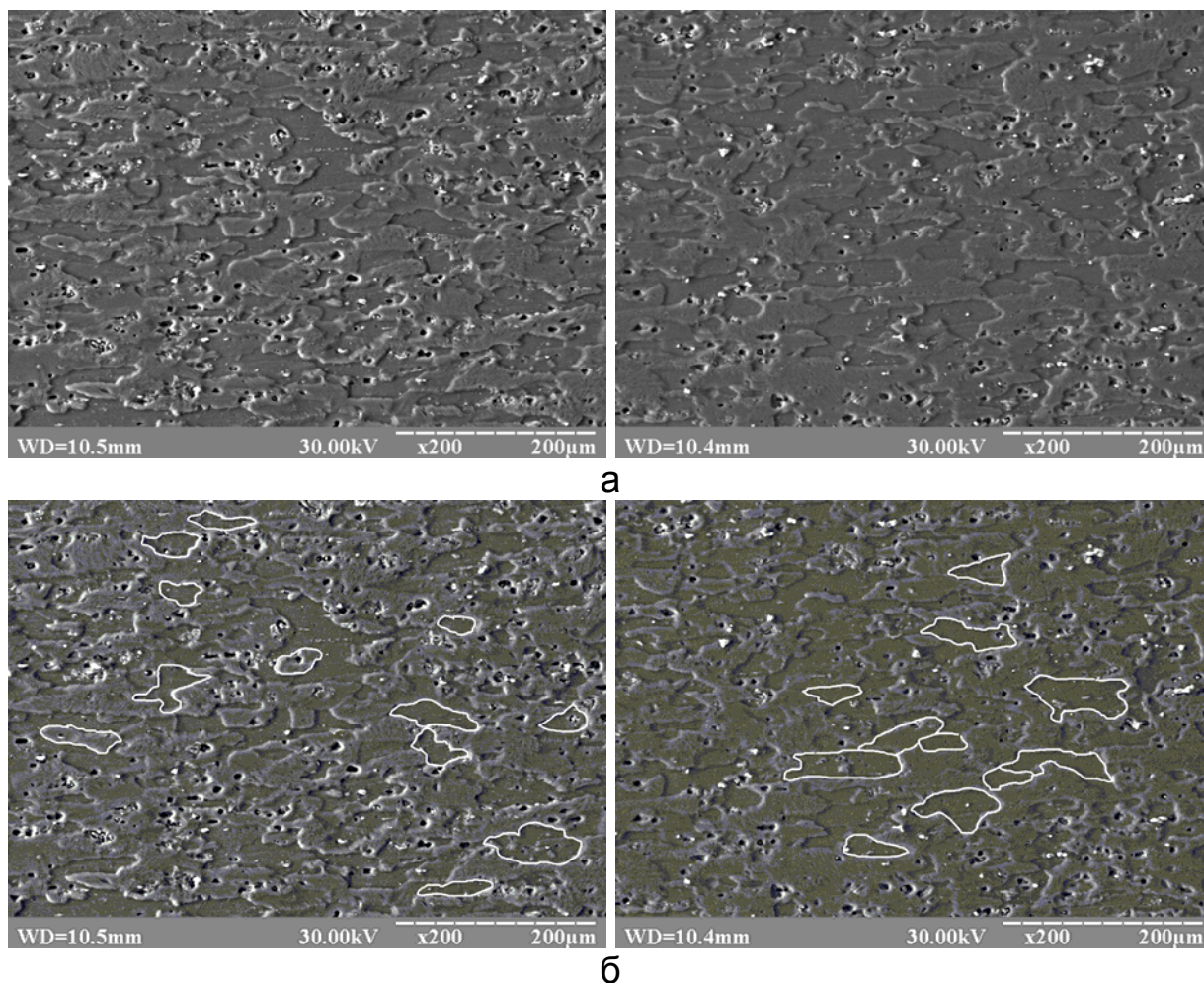


Рисунок 4 – Изображения структуры сплава Д16Т, полученные с помощью растрового электронного микроскопа

В табл. 2 представлены результаты определения величины зерен с помощью указанных выше способов для листов исследуемого материала разной толщины.

Таблица 2 – Средний размер зерен сплава Д16Т для листов разной толщины

Толщина листа, мм	Средний размер зерен d , мм		
	Первый способ (ГОСТ 21073.1-75)	Второй способ (ГОСТ 21073.4-75)	Третий способ
2	0,03	0,03	0,02
5	0,03	0,05	0,04
6	0,05	0,06	0,05
8	0,08	0,08	0,06

Как видно из таблицы, средний размер зерен зависит от толщины листа. Отличие размеров, определенных разными способами, составляет около 0,01...0,02 мм. Первый способ не позволяет достаточно точно определить отличие в размерах малых зерен, поэтому ниже рассмотрены лишь результаты второго и третьего способов.

С помощью третьего способа получено распределение величины зерен (рис. 5).

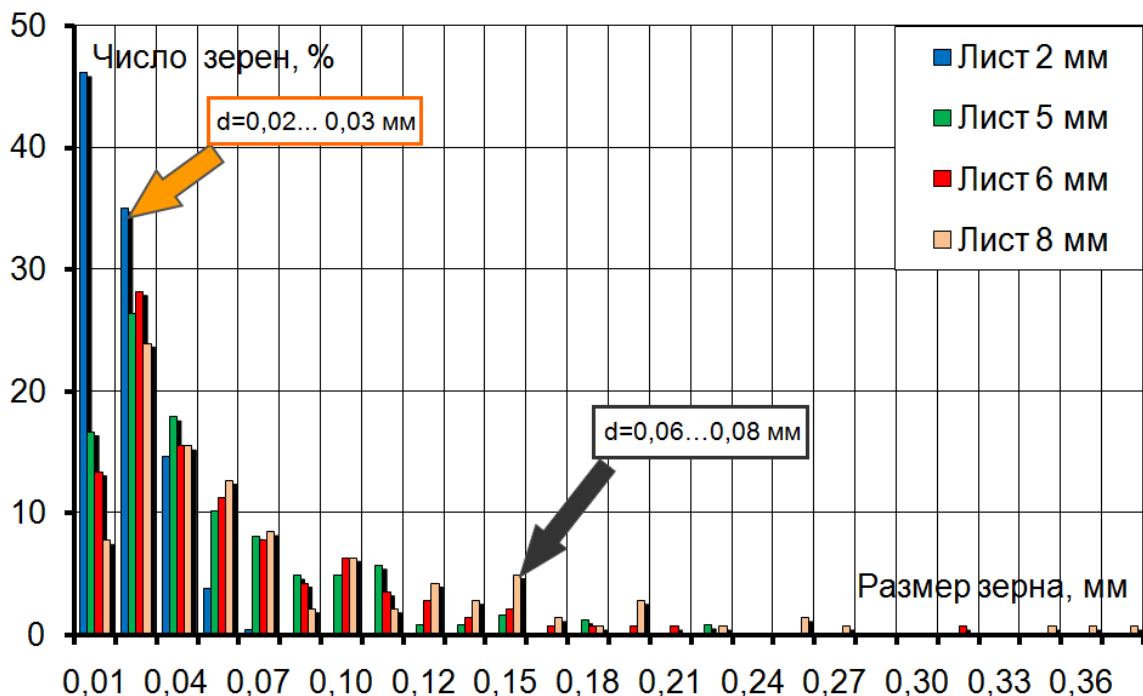


Рисунок 5 – Зависимость числа встречающихся в материале зерен от их размера для Д16Т

Установлено, что лист толщиной 2 мм содержит только сравнительно малые зерна, и в нем нет достаточно крупных зерен (максималь-

ный размер зерна – 0,07 мм). Листы 5, 6 и 8 мм содержат как малые, так и крупные зерна, причем во всех листах наибольшее количество зерен имеют размер около 0,02 мм. Из всех рассмотренных листов лист толщиной 8 мм имеет наибольшее количество крупных зерен и при этом, как уже было отмечено ранее, характеризуется наименьшей долговечностью. Важно отметить, что у листов толщиной 5 и 6 мм близкий средний размер зерен, но лист толщиной 6 мм содержит большее количество крупных зерен и имеет несколько меньшую долговечность.

Можно предположить, что на усталостную долговечность листов Д16Т в многоцикловой области значительно влияет наличие крупных зерен. Косвенным подтверждением данного предположения могут служить результаты работ [16, 17], в которых авторы пришли к аналогичным выводам на основании исследования усталостного разрушения никелевых сплавов в многоцикловой области долговечности. В частности, там указывается, что микротрещины возникают в первую очередь в зернах, размер которых значительно больше среднего размера основной части зерен сплава.

Кроме того, установлено, что средний размер зерен тоже зависит от толщины листа. На рис. 6 показана полученная зависимость толщины листа от среднего размера зерен в сплаве. Эта зависимость имеет практически линейный характер.

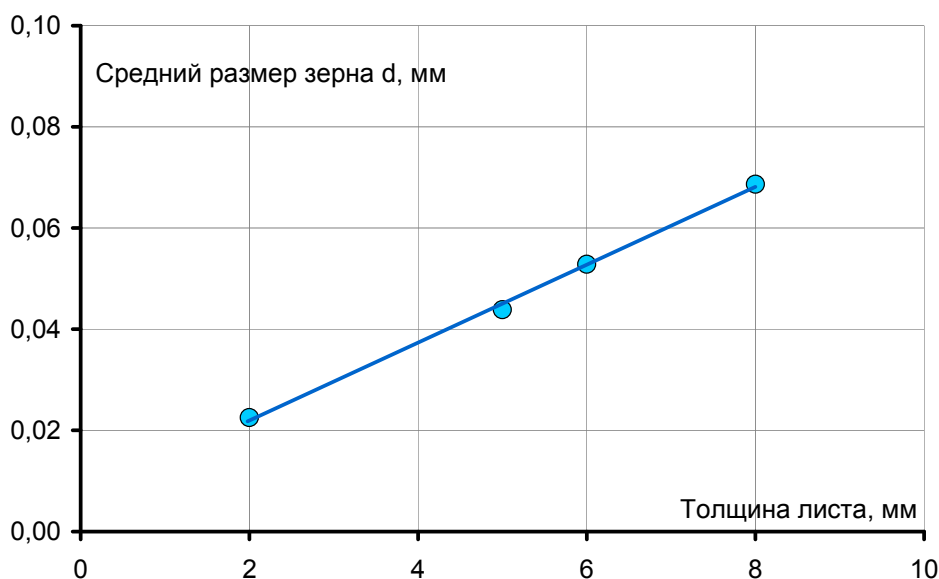


Рисунок 6 – Зависимость толщины листа от среднего размера зерен материала

На рис. 7, 8 показано сравнение кривых усталости гладких образцов из листов различной толщины и соответствующие им средние размеры зерен (приведено среднее значение размера зерен по второму и третьему способам).

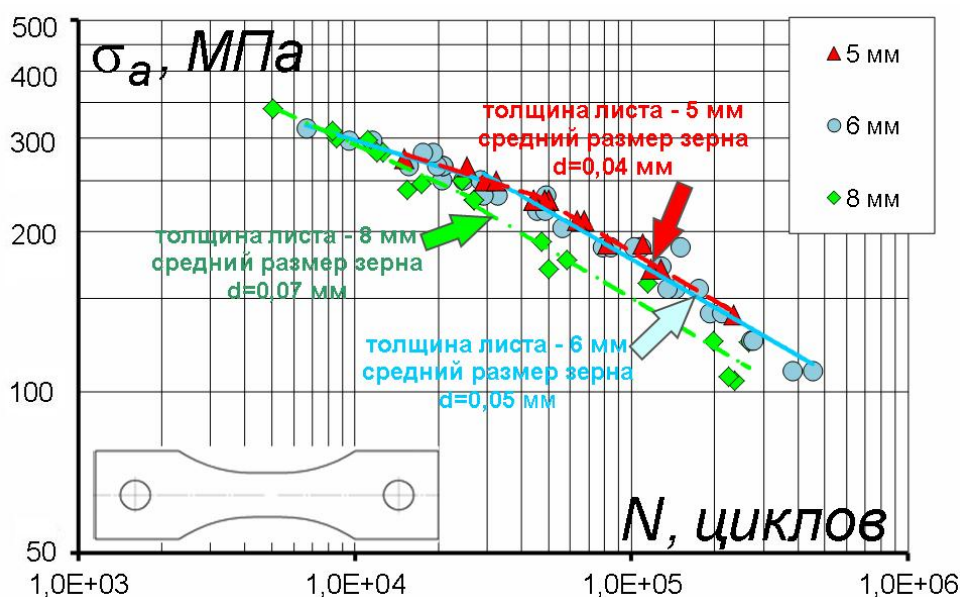


Рисунок 7 – Кривые усталости гладких образцов из листов из Д16Т разной толщины при симметричном регулярном нагружении

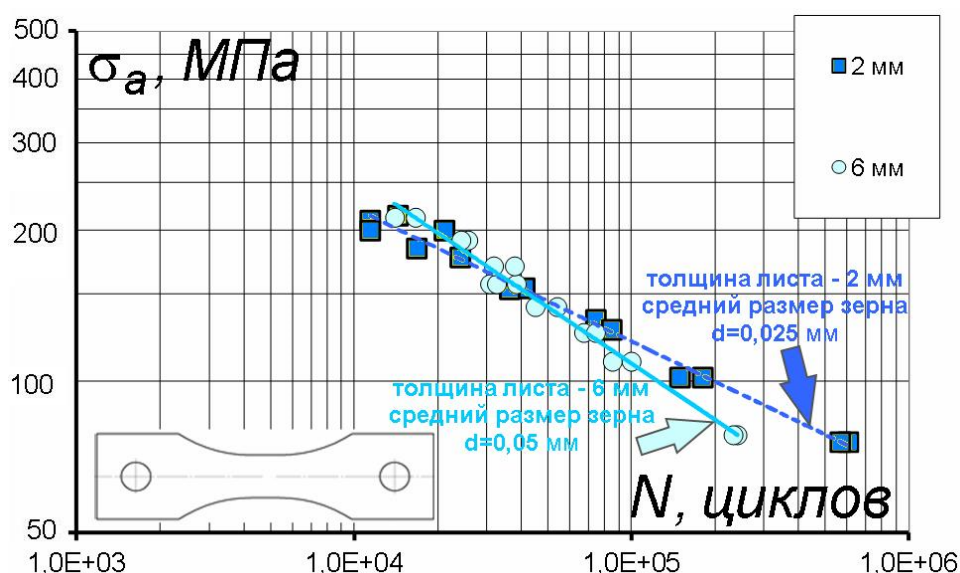


Рисунок 8 – Кривые усталости листов разной толщины материала Д16Т при асимметричном регулярном нагружении ($\sigma_m = 200$ МПа)

Как уже было отмечено, лист толщиной 8 мм содержит наибольшее количество крупных зерен и, как видно из рисунка, при этом имеет существенно меньшую долговечность в сравнении с листами меньшей толщины. Хотя листы толщиной 5 и 6 мм имеют близкую долговечность, но долговечность листа 5 мм больше, что соответствует несколько меньшему размеру зерна.

Выводы

Изменение химического состава сплава Д16Т всех рассмотренных листов соответствует требованиям ГОСТа и мало изменяется в зависимости от толщины, поэтому не может заметно влиять на долговечность.

Установлено, что с уменьшением толщины листа средний размер зерен в нем уменьшается, при этом значительно реже встречаются крупные зерна. В то же время в экспериментах отмечено систематическое повышение долговечности в области многоциклового усталости (до двух и более раз) с уменьшением толщины листа.

В случае листов с близким средним размером большей части зерен существенно меньшую долговечность имеет лист, содержащий сравнительно крупные по сравнению с их средним размером зерна. Следовательно, установлена однозначная связь между долговечностью и размером зерен сплава Д16Т.

Важно отметить, что полученные размеры зерен во всех исследованных листах соответствуют требованиям регламентирующего документа, действующего в настоящее время [18]. Согласно [18] средний размер зерен для листов различной толщины должен не превышать 0,1...0,2 мм, а для исследованных листов он находится в диапазоне 0,025...0,07 мм.

Таким образом, требуется проведение дальнейшего исследования взаимосвязи размеров зерен и усталостной прочности сплавов и, возможно, ужесточение требований нормативных документов к структуре алюминиевых сплавов для обеспечения меньшего рассеяния усталостных характеристик конструкционных материалов.

Список использованных источников

1. Когаев, В.П. Расчет на прочность при напряжениях, переменных во времени [Текст] / В.П. Когаев. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.
2. Хейвуд, Р.Б. Проектирование с учетом усталости [Текст] / Р.Б. Хэйвуд. – М.: Машиностроение, 1969. – 504 с.
3. Серенсен, С.В. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность [Текст] / С.В. Серенсен, В.П. Когаев, Р.М. Шнейдерович. – М.: Машиностроение, 1975. – 488 с.
4. Соппротивление усталости элементов конструкций [Текст] / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебенев и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 240 с.
5. Отчет №1852-8 «Справочные данные по выносливости конструкционных самолетостроительных сплавов». Отделение №18 1977 г. Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского (ФГУП «ЦАГИ»).
6. Третьяков, А.С. Циклические деформационные и усталостные характеристики сплава Д16АТ при асимметричном мягком регулярном нагружении [Текст] / А.С. Третьяков, А.А. Черных // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (59). – Х., 2009. – С. 45 – 53.
7. Решетникова, Р.Ю. Прогнозирование долговечности болтовых соединений по локальному напряженно-деформированному состоянию с учетом осевого и радиального натягов: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02; защищена 4.10.2013; утв. 17.01.2014 / Решетникова Рената Юсуфовна. – Х., 2013. – 187 с.
8. Разработка методов расчета допускаемых напряжений в регулярной зоне конструкции крыла самолета с учетом профиля типового полета: Отчет о НИР / ХАИ; рук. Фомичев П.А.; исполн. Фомичев П.А., Бойко Т.С., Пинчук Д.А., Тыщцкий О.И., Третьяков А.С., Черных А.А., Кучерявый Е.Ф., Вакуленко С.В., Заруцкий А.В., Решетникова Р.Ю., Мандзюк С.Ф., Золотухин Ю.В., Ибрагимова Т.А., Лыпко В.С., Подгорский С.Ю. – Х., 2012. – 103 с.
9. Влияние размера зерна в магниевом сплаве ZK60 на циклическую усталость при комнатной температуре [Текст] / А.В. Данюк, Д.Л. Меерсон, А.Ю. Виноградов, Д.В. Орлов // Вектор науки ТГУ. – Вып. 3. – 2013. – С. 148-152.
10. ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. – Введ. 21.11.97. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 6 с.
11. ГОСТ 21073.0-75. Цветные металлы. Методы анализа. Общие требования. – Введ. 01.07.76. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 8 с.

12. ГОСТ 21073.1-75. Металлы цветные. Определение величины зерна методом сравнения со шкалой микроструктур. – Введ. 01.07.76. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 4 с.

13. ГОСТ 21073.2-75. Металлы цветные. Определение величины зерна методом подсчета зерен. – Введ. 01.07.76. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 4 с.

14. ГОСТ 21073.3-75. Металлы цветные. Определение величины зерна методом подсчета пересечений зерен. – Введ. 01.07.76. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 2 с.

15. ГОСТ 21073.4-75. Металлы цветные. Определение величины зерна планиметрическим методом. – Введ. 01.07.76. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 4 с.

16. D. L. Davidson, R.G. Tryon, M. Oja, R. Matthews, K.S. Ravi Chandran: Fatigue crack initiation in Waspaloy at 20 °C. Metallurgical and Materials Transactions A 38A (2007). – P. 2214 - 2225.

17. J. Miao, T. M. Pollock, J. W. Jones: Microstructural extremes and the transition from fatigue crack initiation to small crack growth in a polycrystalline nickel-base superalloy. Acta Materialia 60 (2012). – P. 2840 - 2854.

18. ОСТ1 90070-92. Листы обшивочные из алюминиевых сплавов.– Технические условия. – Введ. 01.10.92. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 29 с.

Поступила в редакцию 26.08.2014.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.А. Фомичев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*