

Третьяков А. С.

*Национальный
аэрокосмический
университет
им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский
авиационный
институт»*

Tretyakov A. S.

*National Aerospace
University named after
N. Ye. Zhukovsky
“Kharkov Aviation
Institute”*

УДК 629.735.02:620.169.1

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ И УСТАЛОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВА Д16Т ПРИ НЕОДНОРОДНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Представлен анализ результатов экспериментальных исследований кинетики амплитуды остаточной деформации в вершине концентратора напряжений. Испытаны образцы из алюминиевого сплава Д16Т с круговым отверстием при регулярном и блочном нерегулярном деформировании.

Ключевые слова: усталость, кинетика остаточной деформации, энергетический критерий, долговечность, блочное нагружение.

На сегодняшний день накоплен большой объем опытных исследований, описывающих закономерности изменения амплитуды остаточной (неупругой) деформации при циклическом нагружении гладких образцов (т.е. в условиях однородного напряженного состояния) из различных материалов при регулярном и программном нагружении, например [1-4 и многие др.].

На их основе сформирован метод расчета долговечности конструктивных элементов с геометрическими и силовыми концентраторами напряжений по локальному НДС, основанный на энергетическом критерии накопления усталостного повреждения и разрушения [5-7].

Расчет опасной удельной энергии и повреждения, накопленного в опасной точке конструкции, в этом методе проводится с использованием средних значений амплитуды остаточной деформации, определенных опытным путем при испытаниях гладких образцов материала до возникновения трещины (без учета изменения остаточной деформации в процессе эксперимента). Поэтому, чрезвычайно важно количественно оценить величину изменения остаточной деформации в месте наибольшей концентрации напряжений (т.е. в условиях неоднородного напряженного состояния) с наработкой. Эти исследования нужны для понимания того, насколько неучет кинетики

может послужить причиной погрешности при вычислении накопленного повреждения. Однако до сих пор этот вопрос исследован явно недостаточно.

На сегодняшний день также уделено мало внимания сопоставлению расчетных и экспериментальных значений амплитуды остаточной деформации в условиях неоднородного напряженного состояния для многих сплавов цветных металлов. Например, автору известны только две работы, в которых исследован этот вопрос по отношению к алюминиевым сплавам, применяемым в авиационной [8, 9]. При этом лишь работа [8] посвящена концентраторам типа «выточка» и «отверстие», имеющим сравнительно высокие градиенты напряжений, типичные для авиационных силовых конструкций и только при симметричном регулярном нагружении.

Особенно важной частью расчета повреждения по локальному НДС при нерегулярном нагружении является прогнозирование величины остаточной деформации ε_{ar}^* на уровнях нагрузки меньших, чем максимальные (перегрузочные) уровни, которые сравнительно редко встречаются в процессе нагружения. Такие расчеты проводятся в предположении о том, что амплитуды остаточных деформаций на уровнях нагрузки меньше максимального могут значительно превосходить соответствующие



значения при регулярном нагружении [2,5,4 и др.].

Проверка этого предположения для алюминиевых сплавов при неоднородном напряженном состоянии и нерегулярном нагружении до сих пор была выполнена лишь для гладких образцов, нагруженных растяжением-сжатием и местным изгибом [9], неоднородность напряженного состояния которых весьма невелика ($K_T=1,2\dots 1,3$).

Таким образом, для дальнейшего совершенствования методов расчета долговечности по локальному НДС применительно к прогнозированию долговечности авиационных конструкций необходимы исследования, направленные на выявление закономерностей изменения амплитуды остаточной деформации основных авиационных конструкционных материалов – алюминиевых сплавов Д16Т и В95Т в концентраторе напряжений в процессе как регулярного, так и нерегулярного асимметричного нагружения.

Настоящая работа посвящена анализу полученных экспериментально значений остаточных деформаций, реализующихся при циклическом нагружении образцов из сплава Д16АТ, и сравнению полученных величин с расчетными значениями, определенными в соответствии с [5-7].

Исследования выполнены на образцах с концентратором напряжений в виде отверстия двух типоразмеров, обеспечивающих K_T , равные 3,5 и 4,3 (диаметры отверстий 16,5 и 24 мм, соответственно). Образцы изготовлены из листов сплава Д16АТ толщиной 5 мм двух различных партий. Все приведенные в данной работе значения теоретических коэффициентов концентрации и номинальных напряжений определены без учета ослабления сечения отверстием, то есть вычислены на основе сечения «брутто».

Усталостные испытания образцов проведены при регулярном и нерегулярном блочном симметричном и асимметричном мягком нагружении.

Все эксперименты выполнены с помощью испытательного комплекса на базе электромеханических машин УММ. Комплекс использует специально разработанное ПО, предназначенное для фильтрации и обработки экспериментальных данных в режиме реального времени [10].

Текущие значения деформаций в процессе испытаний, которые проведены до возникновения усталостной трещины, измерены в месте наибольшей концентрации напряжений на поверхности отверстия с

помощью специально разработанного высокоточного тензометра [11 с.86]. Тензометр разработан совместно с н.с. Черных А.А. Момент возникновения трещины длиной 0,5...1,8 мм позволила зафиксировать методика, использующая показания того же тензометра, разработанная совместно с инженером Колышкиным А.С. [11 с.91]. Измерение полной и остаточной деформации проведено в момент равенства внешней нагрузки своему среднему значению.

Распределение амплитуд номинальных напряжений при нерегулярном нагружении в блоке – близкое к экспоненциальному. Параметры распределения соответствуют данным, приведенным в [12]. Образцы испытаны при нагрузках, соответствующих долговечности 4 ... 120 блоков нагружения и $7 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^6$ циклов до разрушения.

Описанные испытания образцов с отверстием преследовали ряд целей:

- исследование величин и характера изменения с наработкой остаточных деформаций ε_{ar}^K (кинетики) в месте наибольшей концентрации напряжений в зависимости от значений прикладываемой нагрузки;

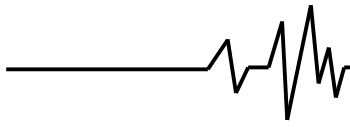
- сопоставление экспериментальных значений средних амплитуд остаточной деформации ε_{ar}^* в гладком материале и на поверхности концентратора напряжений ε_{ar}^{K*} ;

- изучение влияния максимальных уровней нагружения на величину амплитуды остаточной деформации в концентраторе при меньших нагрузках в случаях нерегулярного блочного нагружения;

- сопоставление экспериментальных и расчетных значений остаточных деформаций и долговечностей образцов с различным K_T .

Изменение амплитуды остаточной деформации ε_{ar}^{K*} с наработкой (кинетика) показано на рис. 1, 2., где $\sigma_{ан}^{max}$ – амплитуда номинальных напряжений, соответствующая наибольшей ступени в блоке нагрузок.

Установлено, что амплитуда остаточной деформации в концентраторе напряжений ε_{ar}^K изменяется значительно менее интенсивно, чем в условиях однородного поля напряжений, где это изменение может достигать 3 раз и более. Так, для регулярного нагружения в области многоциклового усталости (более 10^4 циклов до возникновения трещины) максимальное отличие текущих значений остаточной деформации ε_{ar}^K от своего среднего



за експеримент значення ε_{ar}^{K*} в большинстве случаев не превышало 2-х раз и в среднем составило 1,3 раза. Для нерегулярного блочного нагружения это отличие также не

превышало 2-х раз и в среднем составило 1,6 раза для симметричного и 1,4 раза для асимметричного цикла нагружения.

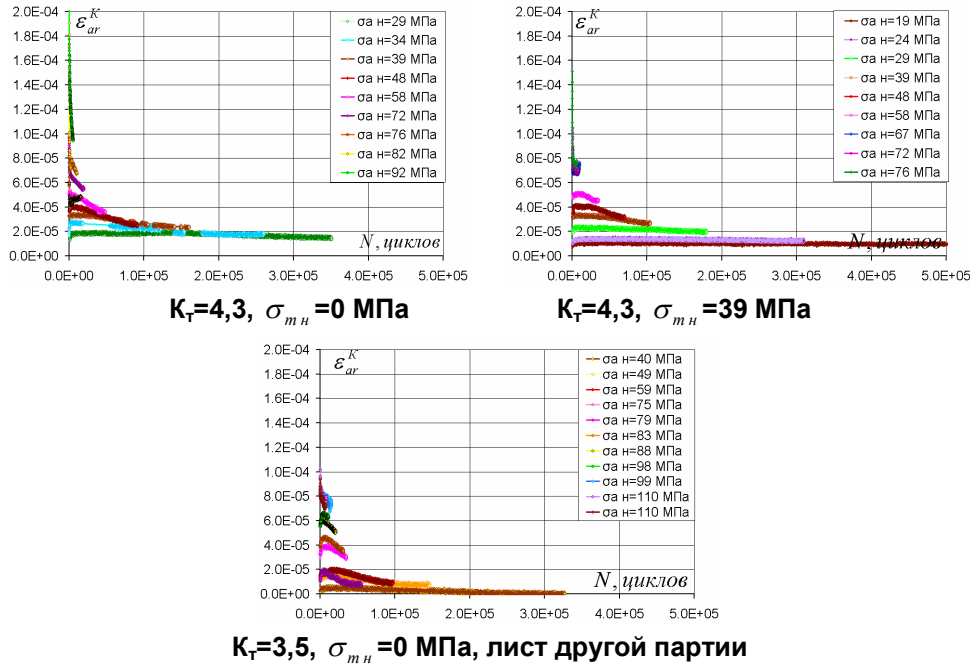


Рис. 1. Изменение амплитуды остаточной деформации ε_{ar}^K с наработкой при регулярном нагружении

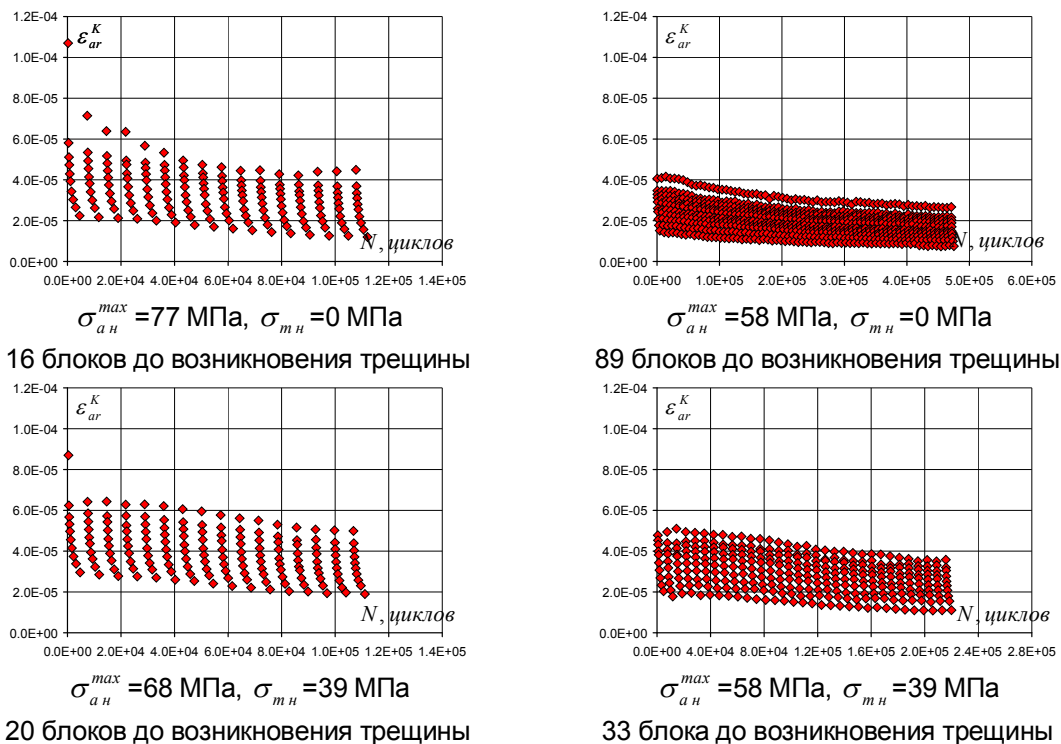
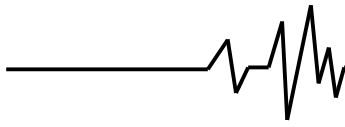


Рис. 2. Изменение амплитуды остаточной деформации ε_{ar}^K с наработкой при нерегулярном блочном нагружении, $K_m=4,3$



Для дополнительной проверки используемого в методе расчета по локальному НДС критерия усталостного разрушения проведено сопоставление кривых усталости материала, полученных по результатам испытания гладких образцов, и кривых усталости образцов с отверстием. Для исключения влияния принятых в методе

гипотез и допущений, кривые усталости приведены в координатах Коффина–Мэнсона «средняя амплитуда остаточной деформации – число циклов до разрушения», а не в координатах «опасная энергия – долговечность», то есть на основе исключительно экспериментальных данных (рис. 3).

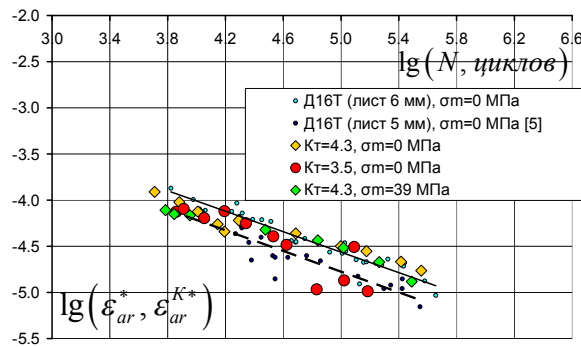


Рис. 3. Кривые усталости материала и образцов с отверстиями в координатах Коффина–Мэнсона

В результате установлено, что зависимости $lg(\varepsilon_{ar}^*) - lg(N)$ для образцов из листов толщиной 5 мм различных партий и разными K_t и гладких образцов из листов толщиной 5, 6 мм лежат в одной совокупности в диапазоне долговечностей $6 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^4$ циклов. При больших значениях долговечности зависимости несколько различаются, так что кривая для образцов с $K_t=4,3$ лежит по правому краю полосы разброса значений для гладких образцов, а образцы с $K_t=3,5$ – по левому. Такое отличие вполне сопоставимо с разбросами, вызванными влиянием различных партий сплава Д16Т.

Таким образом, расчет повреждения, накопленного в концентраторе напряжений, с использованием опасной удельной энергии, вычисленной на основе средней амплитуды остаточной деформации материала, обеспечит точность прогноза долговечности, сопоставимую с разбросами усталостных свойств материала от партии к партии.

Дальнейшее совершенствование метода расчета по локальному НДС крайне затруднено без всестороннего анализа точности прогнозируемой величины амплитуды остаточной деформации. Поэтому проведено сравнение амплитуд остаточной деформации ε_{ar}^{K*} , определенных в соответствии с методом расчета по локальному НДС [5-7], и полученных опытным путем при регулярном и нерегулярном блочном нагружении (рис. 4). На

рисунке показано два способа вычисления остаточной деформации – с учетом влияния максимальных уровней нагрузки на последующие [5] и без.

При нерегулярном нагружении полностью подтвержден эффект влияния максимальных ступеней на ступени с меньшей нагрузкой (увеличение ε_{ar}^K по сравнению с регулярным нагружением) и в случае неоднородного напряженного состояния. Это происходит, если число блоков до возникновения трещины превышает 10, как это и указывалось в работах на основе испытаний гладкого материала [2,5,4].

В результате установлено, что отличие расчетных и экспериментальных значений остаточных деформаций сопоставимо с отличиями различных партий сплава, и составляет около 2 раз. По всей же совокупности испытаний средние отличия расчетных и экспериментальных значений (с учетом влияния максимальных уровней нагрузки на последующие) – около 1,5 раз.

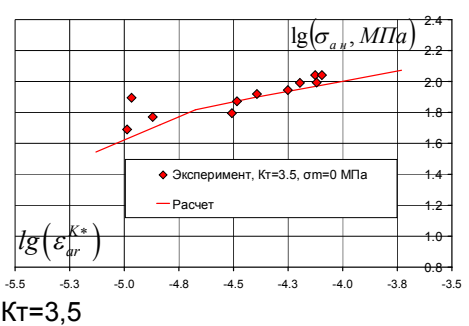
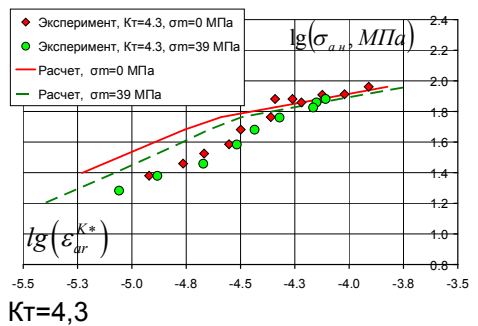
Оценка точности прогнозирования накопленного повреждения проведена путем сравнения расчетных и экспериментальных значений долговечности при регулярном и нерегулярном нагружении.

Установлено, что расчетные и теоретические значения долговечности достаточно хорошо согласуются между собой во всем диапазоне испытаний (расчетные значения, как правило, лежат в полосе

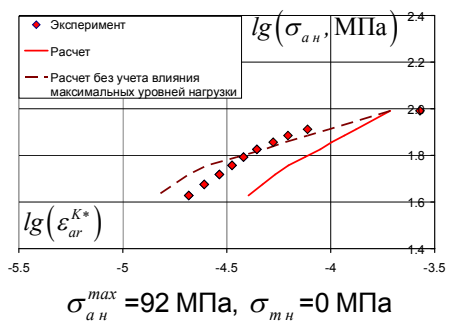


разброса экспериментальных данных). Максимальное отличие не превышает 3-х раз, а среднее – 1,7 раза. Важно подчеркнуть, что в случаях, когда расчет по локальному НДС не

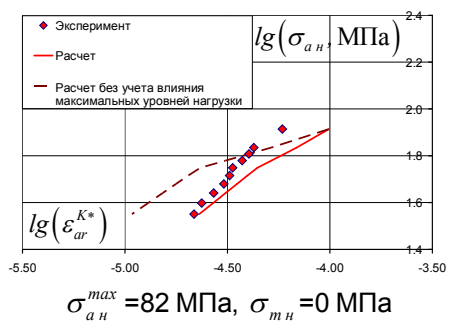
лежит в полосе разброса опытных данных, он обеспечивает консервативную оценку долговечности, обеспечивая расчет в разумный запас.



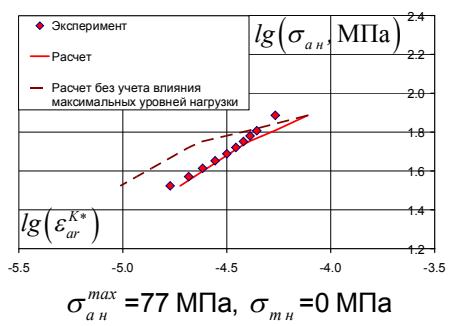
регулярное нагружение



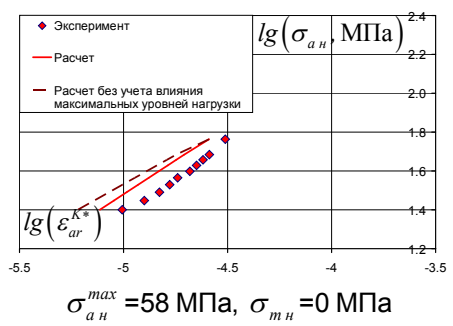
3 блока до возникновения трещины



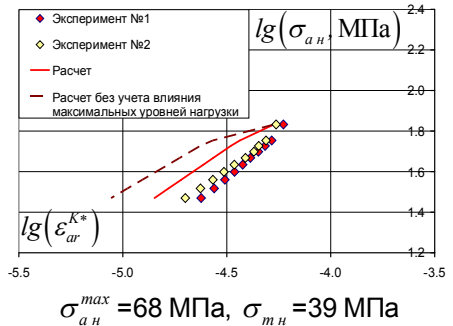
16 блоков до возникновения трещины



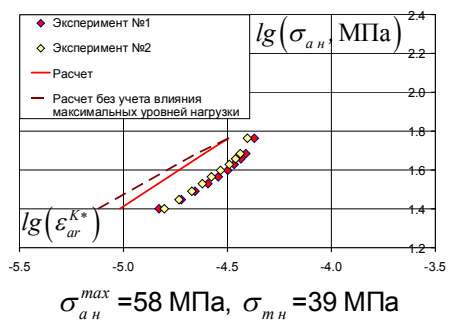
16 блоков до возникновения трещины



89 блоков до возникновения трещины

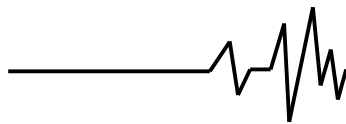


20 блоков до возникновения трещины



32 блока до возникновения трещины

Рис. 4. Диаграммы циклического деформирования



Установлено, что расчетные и теоретические значения долговечности достаточно хорошо согласуются между собой во всем диапазоне испытаний (расчетные значения, как правило, лежат в полосе разброса экспериментальных данных). Максимальное отличие не превышает 3-х раз, а среднее – 1,7 раза. Важно подчеркнуть, что в случаях, когда расчет по локальному НДС не лежит в полосе разброса опытных данных, он обеспечивает консервативную оценку долговечности, обеспечивая расчет в разумный запас.

Выводы. Установлено, что для материала Д16Т кинетика амплитуды остаточной деформации ε_{ar}^K , измеренной на поверхности отверстия в месте наибольшей концентрации напряжений, существенно меньше, чем при однородном напряженном состоянии и отличие экстремального значения остаточной деформации от среднего составляет, в среднем, менее 2-х раз. Это позволяет без существенной погрешности использовать средние значения амплитуды остаточной деформации материала ε_{ar}^* для вычисления остаточной деформации в концентраторе напряжений ε_{ar}^{K*} при расчете долговечности по локальному НДС.

Кривые выносливости, построенные по средним значениям амплитуды остаточной деформации (Коффина-Менсона), измеренным в концентраторе напряжений и на гладких образцах, лежат в пределах разбросов, вызванных различными партиями сплава Д16Т.

Подтверждено, что после действия редких больших уровней нагрузки (перегрузки) в условиях нерегулярного нагружения и неоднородного напряженного состояния амплитуды остаточных деформаций на ступенях превосходят соответствующие значения при регулярном нагружении.

Список использованных источников

1. Циклические деформации и усталость металлов. В 2-х томах, Т.1. Малоцикловая и многоцикловая усталость / В.Т. Трощенко, Л.А. Хамаза, В.В. Покровский и др.; под. ред. В.Т. Трощенко. – К.: Наукова думка, 1985. – 214 с.

2. Фомичев, П.А. Изменение амплитуды пластической деформации при регулярном и программном мягком нагружении сталей [Текст] / П.А. Фомичев, И.Ю. Трубочанин // Проблемы прочности. Вып. 2 – 1991. – С. 39-44.

3. Гребенюк, Я.В. Исследование деформирования конструкционных сталей при циклическом нагружении [Текст] / Я.В. Гребенюк // Авиационно-космическая техника и технология: Тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2001. – С. 343 – 346.

4. Третьяков, А.С. Циклические деформационные и усталостные характеристики сплава Д16АТ при программном нагружении. Сообщение 2. Амплитуда остаточной деформации [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. 1 (69). – Х.: ХАИ, 2012. – С. 47 – 60.

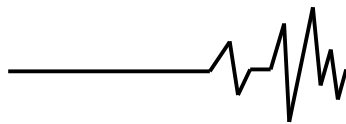
5. Фомичев, П.А. Методы прогнозирования долговечности элементов конструкций при нерегулярном нагружении, основанные на энергетическом критерии разрушения: дис. докт. техн. наук: 01.02.04; защищена 1992 / Фомичев Петр Александрович. – Х., 1992. – 456с.

6. Фомичев, П.А. Прогнозирование долговечности по локальному напряженно-деформируемому состоянию. Сообщение 1. Определение напряжений и деформаций в надрезе при циклическом упругопластическом деформировании [Текст] / П.А. Фомичев, В.В. Звягинцев // Проблемы прочности. – 2000. – №3. – С. 37 – 45.

7. Фомичев, П.А. Прогнозирование долговечности тел с надрезами по локальному напряженно-деформируемому состоянию. Сообщение 2. Определение параметра, характеризующего долговечность тел с концентраторами напряжений [Текст] / П.А. Фомичев // Проблемы прочности. – 2000. – №3. – С. 46 – 55.

8. Звягинцев, В.В. Экспериментальное исследование долговечности и циклической остаточной деформации в зоне концентрации напряжений [Текст] / В.В. Звягинцев, П.А. Фомичев // Прочность конструкций летательных аппаратов – Вып. 9. – Х., 1990. – С. 49 – 58.

9. Третьяков, А.С. Амплитуда остаточной деформации при циклическом нагружении в условиях неоднородного поля напряжений. Сообщение 1. Усталостные испытания образцов из сплава Д16АТ растяжением-сжатием и местным изгибом [Текст] / А.С. Третьяков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (71). – Х., 2012. – С. 97–109.



10. Фомичев, П.А. Методика экспериментальных исследований циклических деформационных и усталостных характеристик конструкционных материалов [Текст] / П.А. Фомичев, А.С. Третьяков, А.А. Черных // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та. – Вып. 2 (53). Х., 2008. – С. 24–34.

11. Теоретические основы расчетов долговечности авиационных конструкций при случайном нагружении: Отчет о НИР / ХАИ; рук. Фомичев П.А.; исполн. Фомичев П.А., Гребенюк Я., Трубочанин И.Ю., Пинчук Д.А., Тышецкий О.И., Бойко Т.С., Кучерявый Е.Ф., Третьяков А.С., Вакуленко С.В., Заруцкий А.В., Решетникова Р.Ю., Черных А.А., Колышкин А.С., Мандзюк С.Ф. – Х., 2009. – 335 с. – Инв. № 02900038207.

12. Черных, А.А. Циклические деформационные и усталостные характеристики сплава Д16АТ при программном нагружении. Сообщение 1. Накопленное повреждение при симметричном нагружении по трем законам распределения амплитуды напряжений [Текст] / А.А. Черных, А.С. Третьяков // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 4 (60). – Х., 2009. – С. 64–76.

Список источников в транслитерации

1. TSiklicheskie deformatsii i ustalost metallov. V 2-kh tomakh, T.1. Malotsiklovaya i mnogotsiklovaya ustalost / V.T. Troschenko, L.A. Khamaza, V.V. Pokrovskiy i dr.; pod. red. V.T. Troschenko. – K.: Naukova dumka, 1985. – 214 s.

2. Fomichev, P.A. Izmenenie amplitudy plasticheskoy deformatsii pri regulyarnom i programmnom myagkom nagruzhennii staley [Tekst] / P.A. Fomichev, I.YU. Trubchanin // Problemy prochnosti. Vyp. 2 – 1991. – S. 39-44.

3. Grebenyuk, YA.V. Issledovanie deformirovaniya konstruktsionnykh staley pri tsiklicheskom nagruzhennii [Tekst] / Ya.V. Grebenyuk // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya: Tr. Nats. aërokosm. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «KHAИ». – KH., 2001. – S. 343–346.

4. Tretyakov, A.S. TSiklicheskie deformatsionnye i ustalostnye kharakteristiki splava D16AT pri programmnom nagruzhennii. Soobschenie 2. Amplituda ostatochnoy deformatsii [Tekst] / A.S. Tretyakov, A.A. CHernykh // Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktsiy letatelnykh apparatov: sb. nauch. tr. Nats.

aërokosm. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «KHAИ». – Vyp. 1 (69). – KH.: KHAИ, 2012. – S. 47–60.

5. Fomichev, P.A. Metody prognozirovaniya dolgovechnosti elementov konstruksiy pri neregulyarnom nagruzhennii, osnovannye na energeticheskom kriterii razrusheniya: dis. dokt. tekhn. nauk: 01.02.04; zaschischena 1992 / Fomichev Petr Aleksandrovich. – KH., 1992. – 456 s.

6. Fomichev, P.A. Prognozirovanie dolgovechnosti po lokalnomu napryazhenno-deformiruemomu sostoyaniyu. Soobschenie 1. Opredelenie napryazheniy i deformatsiy v nadreze pri tsiklicheskom uprugoplasticheskom deformirovanii [Tekst] / P.A. Fomichev, V.V. Zvyagintsev // Problemy prochnosti. – 2000. – №3. – S. 37–45.

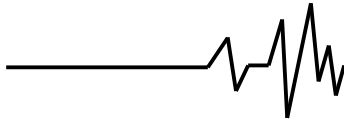
7. Fomichev, P.A. Prognozirovanie dolgovechnosti tel s nadrezami po lokalnomu napryazhenno-deformiruemomu sostoyaniyu. Soobschenie 2. Opredelenie parametra, kharakterizuyushego dolgovechnost tel s kontsentratorami napryazheniy [Tekst] / P.A. Fomichev // Problemy prochnosti. – 2000. – №3. – S. 46–55.

8. Zvyagintsev, V.V. Eksperimentalnoe issledovanie dolgovechnosti i tsiklicheskoy ostatochnoy deformatsii v zone kontsentratsii napryazheniy [Tekst] / V.V. Zvyagintsev, P.A. Fomichev // Prochnost konstruksiy letatelnykh apparatov – Vyp. 9. – KH., 1990. – S. 49–58.

9. Tretyakov, A.S. Amplituda ostatochnoy deformatsii pri tsiklicheskom nagruzhennii v usloviyakh neodnorodnogo polya napryazheniy. Soobschenie 1. Ustalostnye ispytaniya obraztsov iz splava D16AT rastyazheniem-szhatiem i mestnym izgibom [Tekst] / A.S. Tretyakov // Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktsiy letatelnykh apparatov: sb. nauch. tr. Nats. aërokosm. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «KHAИ». – Vyp. 3 (71). – KH., 2012. – S. 97–109.

10. Fomichev, P.A. Metodika eksperimentalnykh issledovaniy tsiklicheskikh deformatsionnykh i ustalostnykh kharakteristik konstruktsionnykh materialov [Tekst] / P.A. Fomichev, A.S. Tretyakov, A.A. CHernykh // Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktsiy letatelnykh apparatov: Sb. nauch. tr. Nats. aërokosm. un-ta. – Vyp. 2 (53). KH., 2008. – S. 24–34.

11. Teoreticheskie osnovy raschetov dolgovechnosti aviatsionnykh konstruksiy pri sluchaynom nagruzhennii: Otchet o NIR / KHAИ; ruk. Fomichev P.A.; ispoln. Fomichev P.A., Grebenyuk YA., Trubchanin I.YU., Pinchuk D.A., Tyshetskiy O.I., Boyko T.S., Kucheryavy E.F., Tretyakov A.S., Vakulenko S.V., Zarutskiy A.V.,



Reshetnikova R.Yu., CHernykh A.A., Kolyshkin A.S., Mandzyuk S.F. – КН., 2009. – 335 s. – Inv. № 02900038207.

12. CHernykh, A.A. TSiklicheskie deformatsionnye i ustalostnye kharakteristiki splava D16AT pri programmnom nagruzhenii. Soobschenie 1. Nakoplennoe povrezhdenie pri simmetrichnom nagruzhenii po trem zakonam raspredeleniya amplitudy napryazheniy [Tekst] / A.A. CHernykh, A.S. Tretyakov // Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktsiy letatelnykh apparatov: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta im. N.E. Zhukovskogo «КНАІ». – Вып. 4 (60). – КН., 2009. – S. 64–76.

ЦИКЛІЧНІ ДЕФОРМАЦІЙНІ ТА ВТОМНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВУ Д16Т ПРИ НЕОДНОРІДНОМУ НАПРУЖЕНОМУ СТАНІ

Анотація. Представлено аналіз результатів експериментальних досліджень кінетики амплітуди залишкової деформації у

вершині концентратора напружень. Досліджено зразки з алюмінієвого сплаву Д16Т з круговим отвором при регулярному та блочному нерегулярному деформуванні.

Ключові слова: втома, кінетика залишкової деформації, енергетичний критерій, довговічність, блочне навантаження.

CYCLIC STRAIN AND FATIGUE PROPERTIES OF D16T ALUMINIUM ALLOY UNDER NONUNIFORM STRESS STATE

Annotation. The work presents experimental results of residual strain amplitude kinetics at the notch tip. Fatigue tests were made on circular hole specimens made of aluminium alloy D16T under regular and block program cyclic loading.

Key words: fatigue, residual strain kinetic, energy criterion, durability, program loading.