

## Прогнозное моделирование усталостной долговечности алюминиевых сплавов при повышенных температурах после воздействия дробеструйного упрочнения

Элвин Аллави Х.<sup>1,3</sup>, кандидат технических наук, лаборатория электромеханических систем (LASEM)  
Ксиби Хатем<sup>2,4</sup>, профессор, постоянный член лаборатории материалов, окружающей среды и энергии,  
факультет естественных наук Гафсы

<sup>1</sup>Инженерный колледж в Сфаксе (ENIS), Сфакс (Тунис)

<sup>2</sup>Подготовительный инженерный институт в Сфаксе (IPEIS), Сфакс (Тунис)

\*E-mail: hatem.ksibi@ipeis.rnu.tn

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1015-2476>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4144-9958>

Поступила в редакцию 18.04.2024

Пересмотрена 22.05.2024

Принята к публикации 11.09.2024

**Аннотация:** Повышение качества поверхности оболочек из алюминиевых сплавов, подвергающихся высоким нагрузкам, остается актуальной задачей, для решения которой используются различные методы. Для алюминиевых сплавов наибольшее распространение получило дробеструйное упрочнение. В статье исследуются усталостные характеристики алюминиевых сплавов 2024-T4 и 2024-T361 после дробеструйного упрочнения и без него при комнатной и повышенной температуре (250 °C). Полученные результаты хорошо согласуются с ранее опубликованными данными, предоставляя полезную информацию о поведении этих сплавов при повышенных температурах. Была разработана математическая модель, объединяющая кривую усталости «напряжение – количество циклов до разрушения», амплитуду нагрузки, температуру и твердость поверхности, подвергнутой дробеструйному упрочнению. Полученные с использованием этой модели результаты были сравнены с гипотезой Майнера для оценки усталостной долговечности. Было установлено, что новая модель обеспечивает более точные прогнозы усталостной долговечности, чем гипотеза Майнера, тем самым повышая надежность и безопасность разработанных на ее основе компонентов при высокотемпературных условиях эксплуатации.

**Ключевые слова:** дробеструйное упрочнение; прогнозная усталостная долговечность; алюминиевые сплавы; AA2024-T4; AA2024-T361; высокотемпературное воздействие; переменное нагружение.

**Для цитирования:** Элвин А.Х., Ксиби Х. Прогнозное моделирование усталостной долговечности алюминиевых сплавов при повышенных температурах после воздействия дробеструйного упрочнения // Frontier Materials & Technologies. 2024. № 4. С. 111–122. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-4-70-10.

### ВВЕДЕНИЕ

Для высоконапряженных компонентов из алюминиевого сплава, таких как пластины и корпуса, дробеструйное упрочнение становится важной процедурой для повышения их долговечности [1]. Дробеструйное упрочнение – это процесс, который упрочняет внешний слой материала путем бомбардировки его поверхности высокоскоростными сферическими частицами, образуя в нем остаточное напряжение сжатия. Ранее были представлены статистические и динамические аспекты этого процесса [2]. В недавнем исследовании с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии были изучены особенности полученной поверхности [3].

Подвергая материал напряжению сжатия, дробеструйное упрочнение упрочняет его поверхность, помогает предотвратить образование и распространение усталостных трещин при его эксплуатации. Таким образом, оно имеет большое значение в обеспечении надежности и долговечности конструкций из алюминиевого сплава, подвергающихся воздействию суровых условий эксплуатации, в том числе в автомобилях, авиации и морских судах.

Гипотеза линейного накопления повреждений была предложена Пальмгреном в 1924 г. [4]. Позже она была развита Майнером и стала известна как гипотеза, или правило, Майнера – Пальмгрена [5]. Данное правило широко использовалось при анализе усталости различных материалов и продолжает оставаться фундаментальным понятием в этой области.

Согласно гипотезе Майнера, усталостное повреждение накапливается линейно до тех пор, пока не произойдет разрушение, которое происходит, когда отношение циклов напряжения равно единице. Проще говоря, усталостную долговечность материала можно оценить путем суммирования повреждений, вызванных различными циклами напряжения. После каждого цикла напряжения появляется определенное количество повреждений, и, когда накопленное повреждение достигает единицы, считается, что материал достиг своего предела усталости, а вероятность разрушения стремится к единице.

Существует несколько теорий накопления повреждений для металлических материалов, причем гипотеза Майнера является одной из наиболее важных [6; 7]. Гипотеза накопления повреждений Майнера широко

используется для оценки усталостной долговечности материалов, подвергаемых циклической нагрузке. Эта гипотеза имеет основополагающее значение в проектировании и строительстве для обеспечения надежности и безопасности компонентов.

$$(D)Damage = \sum \frac{n_i}{N_i} = 100\% = 1, \quad (1)$$

где  $D$  – усталость, разрушение происходит, когда  $D=1$ ;  
 $n_i$  – количество циклов;

$N_i$  – количество циклов до разрушения, определяемое по кривой «напряжение – число циклов» (кривая  $S-N$ ). Кривая  $S-N$  отображает связь между амплитудой циклического напряжения ( $S$ ) и количеством циклов до разрушения ( $N$ ) для данного материала и обычно используется для оценки усталостной долговечности в условиях циклической нагрузки.

Исследовано взаимодействие ползучести и усталости сплава AA7001-T6 при комнатной температуре, 150, 280 и 330 °C [8]. Выявлено, что механические свойства снизились на 37,2, 30 и 24 % для предела прочности на растяжение, предела текучести и модуля Юнга соответственно. Предел прочности и предел текучести увеличились на 5,5 и 5,3 % соответственно, в то время как усталостная прочность улучшилась на 12,3 % после  $10^7$  циклов [9]. Предел усталости также снизился с 208 до 184 МПа при 330 °C. Аналогичное значительное снижение механических и усталостных свойств при повышенной температуре наблюдалось во время исследования образцов из сплава AA2024T351 [10].

В предыдущих исследованиях мы испытывали образцы из сплава AA2024-T4 на растяжение и усталостное напряжение после 10-минутного дробеструйного упрочнения [9; 11]. Обнаружено, что остаточные напряжения сжатия значительно увеличивают усталостную прочность и долговечность сплава.

Автор другой работы предложил теоретическую модель усталостного поведения сплава 2024-T3, опираясь на более ранние работы в этой области, в частности на модель эквивалентных напряжений Уокера [12]. Применение этого решения к представленной модели показало корректную оценку долговечности при переменной амплитуде нагружения для материала, испытанного при комнатной температуре.

Влияние повышенных температур (200–250 °C) на усталостную долговечность сплава AA2024 исследовали в работе [13]. Был сделан вывод, что его механические свойства снизились в 1,6–2,4 раза, а долговечность в 1,8 раза.

В связи с этим было исследовано влияние упрочняющих обработок на накопленные усталостные характеристики сплава AA2024 с помощью двух испытаний на блочное нагружение (120–180 МПа): одно с высокими уровнями напряжения, другое с высокими уровнями напряжения, оба проводились при комнатной температуре [13; 14]. Результаты показали значительное повышение долговечности, приписываемое поверхностному упрочнению, достигнутому за счет дробеструйного упрочнения.

В другой работе изучался сплав AA7001-T6 при усталостном вращательном изгибе при температуре (330 °C), а также после дробеструйного упрочнения при

той же температуре (ДУ+330 °C) [8]. Для корректной оценки долговечности при переменной нагрузке использовали правило Майнера. Было отмечено, что оно обеспечивает достаточный запас прочности для некоторых образцов и недостаточный – для других.

Правило Майнера – Пальмгрена активно дорабатывается и совершенствуется для лучшего соответствия определенным материалам и условиям нагружения при анализе усталостных характеристик [7–10]. Эти разработки способствовали появлению различных изменений в технологии дробеструйной обработки, рекомендаций для улучшения эффективности механической обработки поверхности [15].

Модели развития усталости для сплавов, таких как AA2024, необходимы для прогнозирования усталостной долговечности в различных условиях напряжения. Некоторые известные модели в этой области представлены в [16–18]. Подход Гектора и Де Вейла объединяет экспериментальные данные с теоретическими принципами для оценки усталостной долговечности с учетом различных характеристик, в т. ч. амплитуды напряжения, частоты нагружения и микроструктуры материала [16]. Широко используемая модель Фатем и Янга учитывает влияние среднего напряжения и амплитуды напряжения на усталостную долговечность. В этой модели используются экспериментальные данные и аналитические подходы для оценки усталостной долговечности при различных условиях нагружения [17]. Наконец, модель конечных элементов для сплава AA2024, разработанная Ли и др., прогнозирует усталостную долговечность, объединяя многочисленные параметры, такие как остаточное напряжение материала, упрочнение и условия нагружения [18].

В литературе доступны другие модели для расчета долговечности [19–21], разработанные во второй половине XX в. Но при использовании подобных моделей применительно к ряду материалов, таких как AA2024, в работах наблюдаются противоречивые результаты. Так, в 1954 г. [19] были проведены испытания при знакопеременных нагружениях с использованием различных режимов циклирования. В 2022 г. была исследована модель накопленных усталостных повреждений на основе взаимодействия нагрузок и снижения прочности [20]. Было показано, что предложенная авторами модель накопленных повреждений больше соответствовала экспериментальным данным, но только при более высоких циклических нагрузках [21].

В настоящей работе использовался метод дробеструйного упрочнения поверхности алюминиевых сплавов AA2024-T4 и AA2024-T361. Исследование направлено на повышение безопасности воздушных судов путем создания точных прогнозных моделей усталостной долговечности алюминиевых сплавов спецификации AA2024 в условиях повышенных температур после дробеструйного упрочнения. Эффективность сплавов AA2024-T4 и AA2024-T361 оценивалась путем сравнения их с ранее представленными данными. Анализ различных подходов к прогнозированию усталости по сравнению с экспериментальными данными дает полезные сведения, позволяющие совершенствовать модели и повышать безопасность конструкции воздушных судов.

Цель исследования – изучить характеристики алюминиевых сплавов AA2024-T4 и AA2024-T361 при по-

вышенных температурах с дробеструйным упрочнением и без него; понять, влияют ли повышенные температуры и дробеструйное упрочнение на механические характеристики и усталостную долговечность этих сплавов; предложить идеи для повышения их долговечности и надежности в условиях повышенных температур.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная фаза началась с выбора образцов и анализа их химического состава для обеспечения точного и надежного последующего тестирования и анализа. Для исследования были выбраны два конкретных алюминиевых сплава: AA2024-T4 и AA2024-T361. Эти сплавы имеют одинаковый базовый состав, но подвергаются разным видам отпуска, что приводит к появлению разных механических свойств. Изучение двух вариантов позволяет более полно понять влияние отпуска на поведение материала.

В настоящей модели в основном используется кривая  $S-N$  и связанные с ней предположения, в частности наклон  $\alpha$  и предел усталостной выносливости. Она также включает эффекты последовательного нагружения при двух различных уровнях напряжения: низком ( $\sigma_L$ ) и высоком ( $\sigma_H$ ).

Для проведения усталостных испытаний использовался аппарат SCHENCK PUNU (SCHENCK USA CORP.),

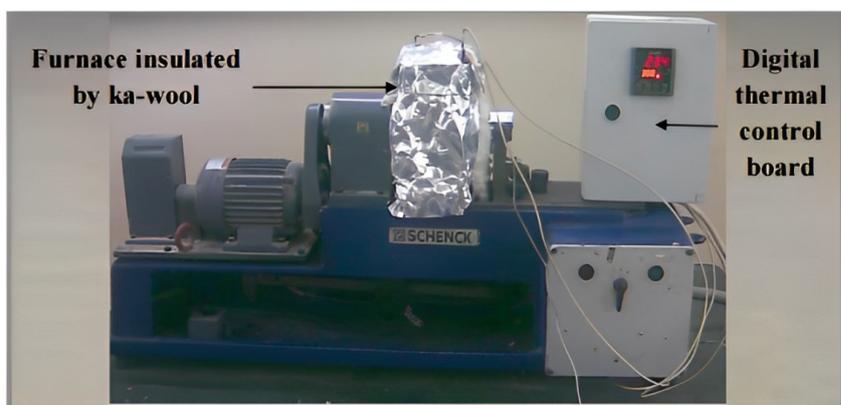
который может выполнять циклическое нагружение при комнатной и повышенной температуре (рис. 1 а). Для высокотемпературного испытания использовали печь, изолированную каолиновой ватой (рис. 1 b). В лаборатории COSQC-Baghdad был проведен химический анализ сплавов, чтобы убедиться, что они соответствуют требованиям ISQ 1473/1989. Для этого использовали современный спектрометр ARC-MET 8000 (Verichek Technical Services, США). Таблица 1 содержит химический состав сплавов, а также данные соответствующих стандартов. Механические характеристики сплавов AA2024-T4 и AA2024-T361 занесены в таблицу 2.

Наше исследование сосредоточено на изучении усталостного поведения в условиях переменной нагрузки. Поэтому нами рассмотрены четыре различных режима условий испытаний, описанные в таблице 3. Коэффициент корреляции  $R^2$  оценивает степень согласия статистической модели, особенно в линейном регрессионном анализе. В этом контексте обозначим переменную  $D_i$  как усталостное повреждение, вызванное переменной амплитудой нагружения, а  $n_i$  как приложенные циклы на  $i$ -м уровне нагружки с постоянной амплитудой.

Анализ усталостных характеристик проведен на основе экспериментальных данных, собранных во время непрерывных усталостных испытаний. 18 усталостных образцов (рис. 2) исследовались при трех уровнях



*a*



*b*

**Рис. 1.** Машина для усталостных испытаний (SCHENCK PUNU):  
*a* – при комнатной температуре; *b* – при высокой температуре с использованием печи  
**Fig. 1.** Fatigue testing (SCHENCK PUNU):  
*a* – at room temperature; *b* – at high temperature using a furnace

**Таблица 1.** Результаты химического анализа сплавов AA2024-T4 и AA2024-T361, мас. %  
**Table 1.** Chemical analysis of AA2024-T4 and AA2024-T361 measured, wt. %

Элемент	Экспериментальные измерения, AA204-T4	Экспериментальные измерения, AA204-T361	Номинальный химический состав, AA2024-T4 [24]	Номинальный химический состав, AA2024-T361 [24]
<b>Cu</b>	4,10	4,6	от 3,8 до 4,9	от 3,8 до 4,9
<b>Fe</b>	0,38	0,5	0,5	от 0 до 0,5
<b>Si</b>	0,25	0,5	0,5	от 0 до 0,5
<b>Mn</b>	0,48	0,7	от 0,3 до 0,9	от 0,3 до 0,9
<b>Mg</b>	0,42	1,7	от 1,2 до 1,8	от 1,2 до 1,8
<b>Zn</b>	0,12	0,25	0,25	от 0 до 0,25
<b>Cr</b>	0,05	0,045	0,15	от 0 до 0,1
<b>Al</b>	Остальное	Остальное	от 90,9 до 93,0	от 90,7 до 94,7

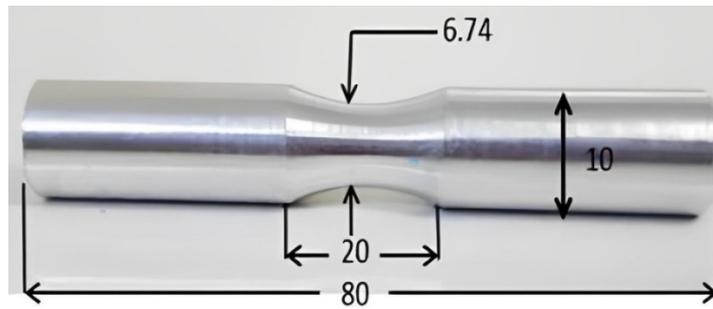
**Таблица 2.** Механические свойства алюминиевых сплавов AA2024-T4 и AA2024-T361  
**Table 2.** Mechanical properties of aluminum alloys AA2024-T4 and AA2024-T361

Механические свойства	AA2024-T4	AA2024-T361
Предел прочности, МПа	470	487
Предел текучести	325	345
Относительное удлинение при разрыве, %	12	11
Модуль Юнга, МПа	720	710
Твердость по Роквеллу, В	72	71
Коэффициент Пуассона	0,33	0,32

**Таблица 3.** Условия испытаний [10]  
**Table 3.** Selection of test conditions [10]

Настройки	Эмпирическая модель
Режим (1), 250 °С, AA2024-T4	$\sigma_f=2719 N_f^{-0,2053}, R^2=0,969$
Режим (2), ДУ+250 °С, AA2024-T4	$\sigma_f=2243 N_f^{-0,1896}, R^2=0,970$
Режим (3), 250 °С, AA2024-T361	$\sigma_f=2665 N_f^{-0,2005}, R^2=0,996$
Режим (4), ДУ+250 °С, AA2024-T361	$\sigma_f=2709 N_f^{-0,1972}, R^2=0,924$

Примечание. ДУ – дробеструйное упрочнение.  
 Note. ДУ is shot peening.



**Рис. 2.** Размеры образца в мм в соответствии с DIN 50113  
**Fig. 2.** Fatigue sample dimensions in mm as per DIN 50113 standard specifications

напряжения – 323 МПа (0,7 предела прочности на разрыв), 277 МПа (0,6 предела прочности на разрыв) и 231 МПа (0,5 предела прочности на разрыв), на каждом уровне напряжения испытывалось по три образца. Средние результаты были получены непосредственно с аппарата для усталостных испытаний. Затем были построены кривые *S–N* и получены их уравнения для выбранных режимов. Детали кривых *S–N*, или уравнений Басквина, приведены в таблице 4.

Согласно правилу Майнера разрушение происходит, когда накопленное усталостное повреждение достигает предела. Для двух рассматриваемых блоков это означает, что разрушение происходит в тот момент, когда

$$\left[ \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \right] = 100\% = 1. \quad (2)$$

Если участвует более двух блоков, уравнение обобщается следующим образом:

$$\sum \frac{n_i}{N_F} = 1. \quad (3)$$

Следует упомянуть, что эксперименты с переменной нагрузкой на образцах из плоского листа AA2024-T3 показали, что значения повреждений  $\sum \frac{n}{N_F}$  варьируются от 0,61 до 1,45, но в среднем близки к 1,0 [8]. Следует учитывать ограничения этого закона в высокотемпературных средах, чтобы обеспечить более точную оценку усталостной долговечности в условиях переменной нагрузки. Повышенные температуры могут существенно влиять на свойства материала, приводя к изменениям в поведении материалов при циклической нагрузке.

В нашем исследовании испытания проводились на 24 цилиндрических образцах с коэффициентом асимметрии цикла  $R=-1$ . Для каждого случая было испытано 6 образцов: три для низко-высокой двухблочной нагрузки и три для высоко-низкой двухблочной нагрузки с условиями переменной нагрузки. Исследование было направлено на определение средней усталостной долговечности этих образцов.

Разработанная модель безопасного прогнозирования (safe proposed model, SPM) основывается на том, что любое усталостное повреждение  $D_v$  при переменной

**Таблица 4.** Уравнения *S–N* кривых с коэффициентом корреляции ( $R^2$ ) для четырех режимов  
**Table 4.** *S–N* curve equations with correlation factor ( $R^2$ ) for the four cases

Режим №	Обозначение	Описание
1	250 °C	Испытания на совокупную усталость при двух вариантах напряжения: низко-высоком и высоко-низком для алюминиевого сплава AA2024T4 при 250 °C
2	ДУ+250 °C	Испытания на совокупную усталость при двух вариантах напряжения: низко-высоком и высоко-низком для сплава AA2024T4, подвергнутого дробеструйному упрочнению и высокой температуре
3	250 °C	Испытания на совокупную усталость при двух вариантах напряжения, низко-высоком и высоко-низком для алюминиевого сплава AA2024-T361 при 250 °C
4	ДУ+250 °C	Испытания на совокупную усталость при двух вариантах напряжения: низко-высоком и высоко-низком для сплава AA2024-T361, подвергнутого дробеструйному упрочнению и высокой температуре

Примечание. ДУ – дробеструйное упрочнение.

Note. ДУ is shot peening.

нагрузке требует определения. Представляется, что  $D_v$  должно учитывать эффект последовательности, механические свойства и проверенную кривую  $S-N$  для данного случая.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В надежной модели развития усталости для алюминиевых сплавов, подвергнутых дробеструйному упрочнению [10], используется правило Майнера, исходя из предположения, что кривая  $S-N$  учитывает 100 % усталостного повреждения. Однако это предположение несколько нереалистично, поскольку кривая  $S-N$  не оценивает повреждаемость материала. Необходимо подчеркнуть, что усталостное повреждение является сложным процессом, который не может быть полностью охвачен одним параметром повреждения, особенно при повышенных температурах. В случае дробеструйного упрочнения рассматривалось только нормальное соударение, чтобы обеспечить прямое сравнение с ранее опубликованными результатами.

Процедура оптимизации [22] предполагает, что отдельные дробинки действуют независимо, и взаимодействие между ними игнорируется. Оптимизация упрощает анализ и позволяет сосредоточиться на ключевых параметрах. Однако она может упускать из виду кумулятивные эффекты, которые могут повлиять на результат дробеструйного упрочнения.

Дробеструйная обработка материала проводилась в течение 10 мин, что достаточно для значимого повышения долговечности. Тест демонстрирует значительное преимущество дробеструйного упрочнения в повышении усталостной прочности материала. Напряжение резко уменьшается с увеличением числа циклов; снижение более заметно при более высоких температурах, как показано на рис. 3. Число циклов уменьшается приблизительно с 105 000 до 80 000 по мере повышения температуры с температуры окружающей среды до 200 °С, причем наибольшее снижение зафиксировано

при 250 °С.  $S$ -кривая в сочетании с формулами усталостной долговечности и значениями  $R^2$  (таблица 3) обеспечивает лучшее понимание усталостной прочности. Такой анализ помогает оптимизировать характеристики сплавов и процессов, что приводит к значительному продлению их срока службы.

Попытки описать нелинейную модель одним параметром повреждения не позволили улучшить правило Майнера и предложить надежные прогнозы для широкого диапазона режимов. Несмотря на попытки объединить нелинейные функции повреждения, ограничения правила Майнера остаются нерешенными. Это подводит нас к вопросу о том, как точно определить усталостное повреждение  $D_v$ . Оно представляет собой накопленное повреждение, которое возникает в сплаве из-за циклической нагрузки. В настоящей работе представлено новое определение  $D_v$ , которое зависит от:

- механических свойств, таких как предел прочности  $\sigma_{UTS}$  и предел текучести  $\sigma_y$ ;
- кривой  $S-N$ , т. е. наклона кривой  $\alpha$  и предела усталости при выносливости  $\sigma_e$ , полученных из уравнения кривой  $S-N$  при  $10^7$  циклах для данного случая;
- эффекта последовательности нагрузки, низкого напряжения  $\sigma_L$  и высокого напряжения  $\sigma_H$ .

На основе вышеизложенных данных можно рассчитать  $D_v$  для низко-высокой нагрузки:

$$D_v = \left[ \frac{\sigma_{UTS} - \sigma_L}{\sigma_{UTS} - \sigma_H} \right] \left( \frac{\sigma_b}{\sigma_H} \right)^\alpha ; \quad (4)$$

для высоко-низкой нагрузки:

$$D_v = \left[ \frac{\sigma_{UTS} - \sigma_L}{\sigma_{UTS} - \sigma_H} \right] \left( \frac{\sigma_u}{\sigma_u} \right)^\alpha . \quad (5)$$

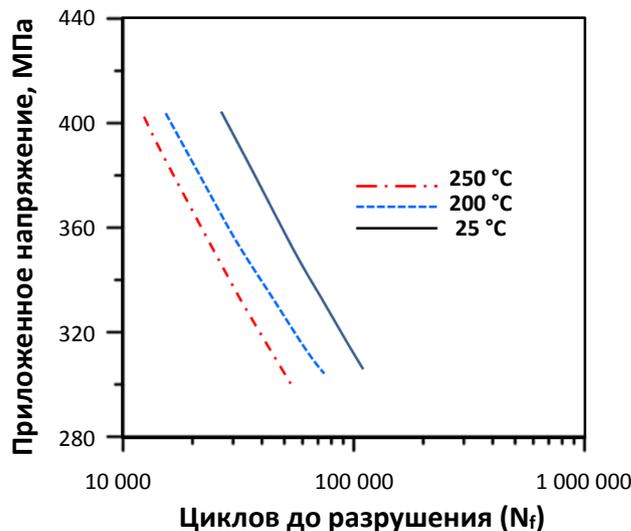


Рис. 3. Постоянные кривые усталости ( $S-N$  кривые) при трех температурах (комнатная температура, 200 °С, 250 °С)  
 Fig. 3. Constant  $S-N$  curves at three temperatures (room temperature, 200 °C, 250 °C)

Опираясь на работу [23], усталостную долговечность при переменном нагружении можно определить для высоко-низкой нагрузки:

$$N_{fv} = \frac{\left[ \frac{\sigma_{UTS} - \sigma_L}{\sigma_{UTS} - \sigma_H} \right] \left( \frac{\sigma_u}{\sigma_u} \right)^\alpha (\sigma_{UTS} - \sigma_L)^{-\frac{1}{\alpha}}}{A^\alpha \left( \sigma_H^{1-\frac{1}{\alpha}} - \sigma_L^{1-\frac{1}{\alpha}} \right)} ; \quad (6)$$

для низко-высокой нагрузки:

$$N_{fv} = \frac{\left[ \frac{\sigma_{UTS} - \sigma_L}{\sigma_{UTS} - \sigma_H} \right] \left( \frac{\sigma_u}{\sigma_u} \right)^\alpha (\sigma_H - \sigma_L)^{-\frac{1}{\alpha}}}{A^\alpha \left( \sigma_H^{1-\frac{1}{\alpha}} - \sigma_L^{1-\frac{1}{\alpha}} \right)} . \quad (7)$$

Экспериментальные нагрузочные испытания (высоко-низкая нагрузка и низко-высокая нагрузка) проводились для сплавов AA2024-T4 и AA2024-T361 при различных температурах, с дробеструйным упрочнением

и без него, с использованием описанного ранее аппарата. Наблюдаемое максимальное, среднее и прогнозируемое безопасной моделью количество циклов приведено в таблице 5.

На рис. 4 представлены гистограммы, построенные на основе экспериментальных результатов (таблица 5).

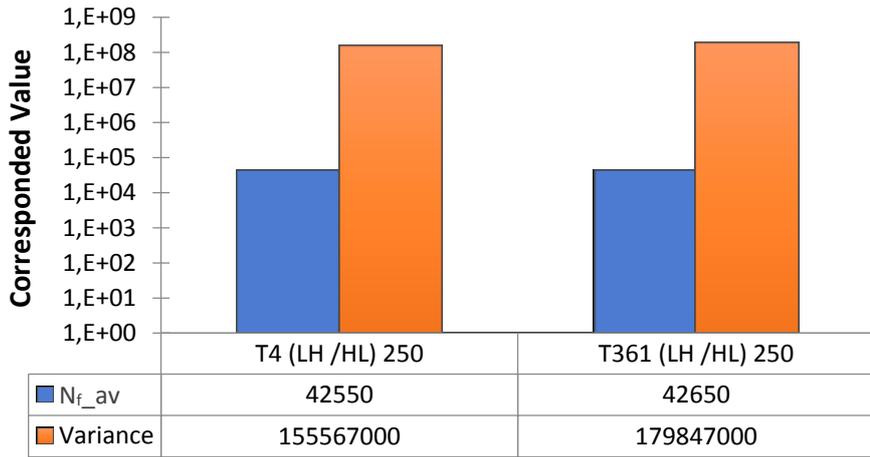
Из полученных результатов видно, что предложенная модель предсказывает усталостную долговечность близко к экспериментальным данным. Действительно, на рис. 5, 6 представлено сравнение прогнозов развития усталости, демонстрирующее, как модельные прогнозы согласуются с экспериментальными данными или отклоняются от них. Это дает представление о производительности и надежности модели безопасного прогнозирования при оценке усталостной долговечности для исследуемых алюминиевых сплавов.

На рис. 5, 6 показана значительная разница между использованием стандартного правила Майнера и экспериментальными результатами, полученными на образцах. Правило Майнера последовательно дает прогнозы, которые превышают фактическую усталостную долговечность, в первую очередь потому, что оно не учитывает такие важные факторы, как колебания температуры и влияние дробеструйного упрочнения, которые учитываются моделью безопасного прогнозирования.

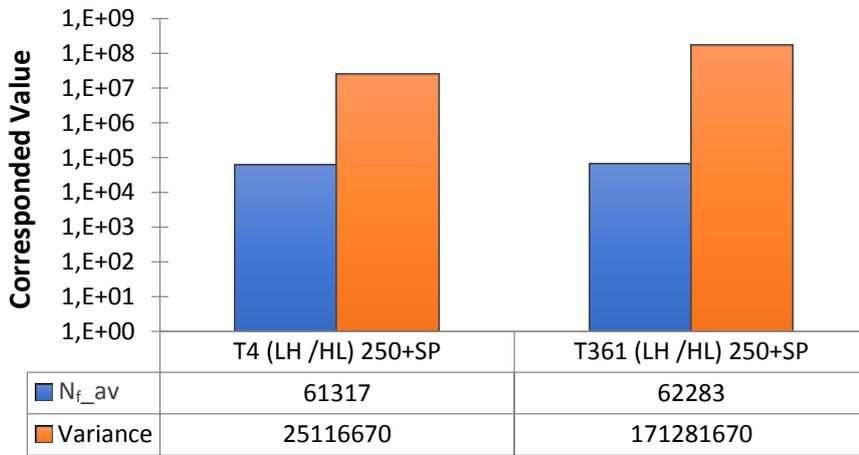
**Таблица 5.** Совокупная усталостная долговечность: экспериментальные результаты и модельное прогнозирование  
**Table 5.** Cumulative fatigue life: experimental results and safe model prediction

Последовательность нагружения	Сплав	Номер образца	Экспериментальное число циклов, $N_{f\_exp}$	Среднее число циклов, $N_{f\_av}$ [10]	Смоделированное число циклов, $N_{f\_model}$
Низко-высокий, 250 °C  Высоко-низкий, 250 °C	AA2024-T4	1	38 800	50 800	40 712
		2	51 000		
		3	62 600		
		4	41 800	34 300	28 151
		5	29 600		
		6	31 500		
Низко-высокий, ДУ+250 °C  Высоко-низкий, ДУ+250 °C	AA2024-T4	7	48 200	69 267	35 352
		8	71 600		
		9	88 000		
		10	60 500	53 367	25 765
		11	49 600		
		12	50 000		
Низко-высокий, 250 °C  Высоко-низкий, 250 °C	AA2024-T361	13	42 800	48 867	47 636
		14	66 000		
		15	37 800		
		16	48 200	36 433	34 360
		17	32 400		
		18	28 700		
Низко-высокий, ДУ+250 °C  Высоко-низкий, ДУ+250 °C	AA2024-T361	19	53 000	68 767	61 885
		20	84 500		
		21	68 800		

Примечание. ДУ – дробеструйное упрочнение.  
 Note. ДУ is shot peening.



a



b

Рис. 4. Совокупная усталостная долговечность: сравнительный анализ сплавов AA2024-T4 и AA2024-T361 (усредненный анализ  $N_{f\_av}$  и вариационный анализ)

Fig. 4. Cumulative fatigue life: a comparative study of AA2024-T4 and AA2024-T361 alloys (average  $N_{f\_av}$  and variance analysis)

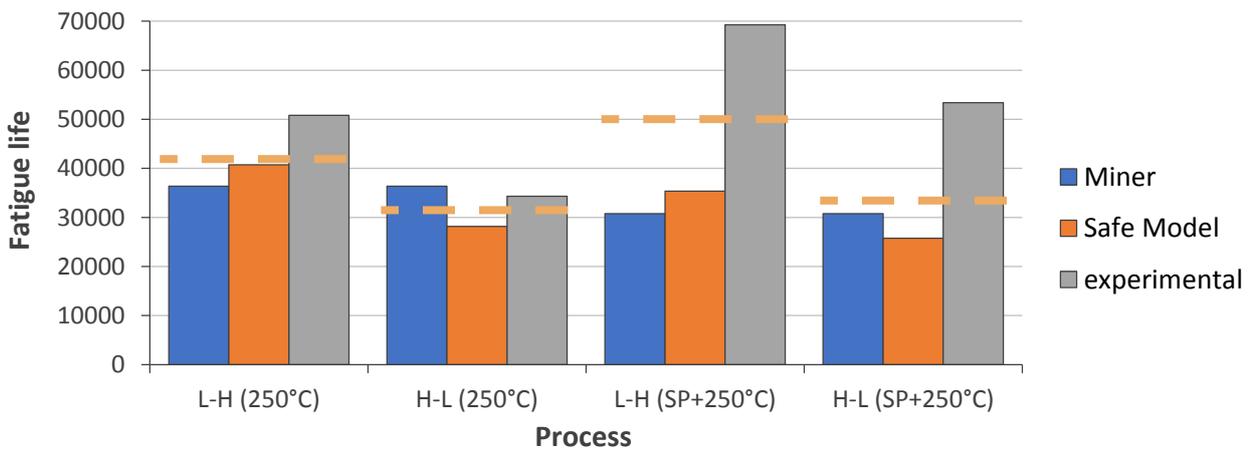
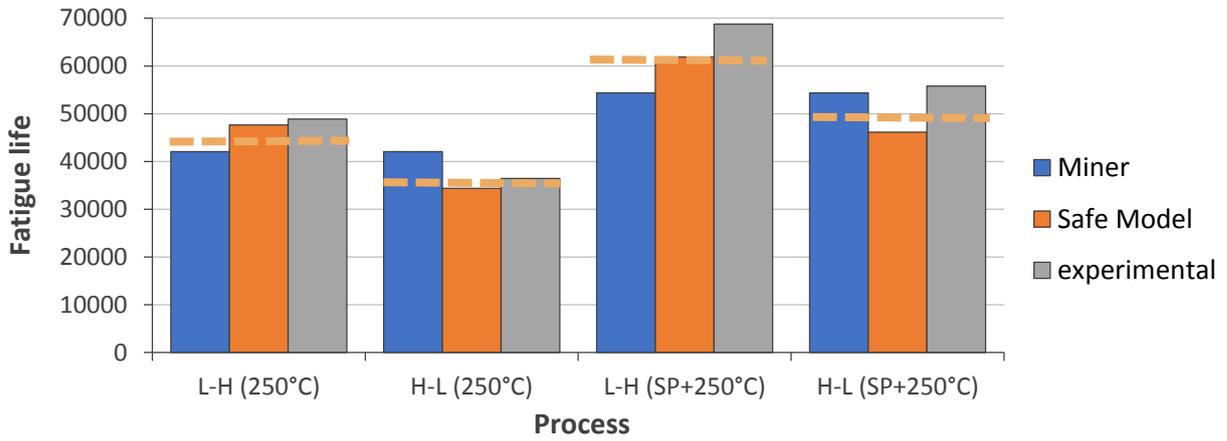


Рис. 5. Сравнение экспериментальных результатов и результатов моделирования для сплава AA2024-T4. Оранжевая пунктирная линия соответствует модели безопасного прогнозирования и значениям экспериментальной усталостной долговечности для каждого режима дробеструйного упрочнения

Fig. 5. Comparison between experimental and model prediction AA2024-T4. The orange dashed line consistently matches both the safe model predictions and the experimental fatigue life values in every shot peening case (shot peening scenario)



**Рис. 6.** Сравнение трех методов усталостного прогнозирования для сплава AA2024-T361.

Оранжевая пунктирная линия соответствует модели безопасного прогнозирования и значениям экспериментальной усталостной долговечности для каждого режима дробеструйного упрочнения

**Fig. 6.** Comparison of three methods for fatigue prediction for AA2024-T361.

The orange dashed line consistently matches both the safe model predictions and the experimental fatigue life values in every shot peening case (shot peening scenario)

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе данных, представленных в таблице 5, можно провести комплексную оценку усталостной долговечности, сравнив экспериментально полученную кумулятивную усталостную долговечность с прогнозами безопасной модели. Действительно, спецификация сплава AA2024, будь то T4 или T361, является фактором, оказывающим существенное влияние на усталостные характеристики. Можно предположить, что модель безопасного прогнозирования больше подходит для сплава AA2024-T361, чем для AA2024-T4. Кроме того, она оказалась эффективной в режиме дробеструйного упрочнения при повышенной температуре (250 °C).

Кроме того, правило Майнера дает лишь приближительную оценку усталостной долговечности со значительными ошибками из-за различных ограничений, как показано на рис. 5, 6 для сплавов AA2024-T4 и AA2024-T361. Во-первых, данное правило предполагает, что вклад циклов нагружения ниже предела выносливости незначителен. Во-вторых, оно не учитывает последствия обработок, таких как дробеструйное упрочнение, и факторов окружающей среды, таких как температура. Наконец, оно не учитывает значимость последовательностей нагрузки от низких к высоким и наоборот. В отличие от правила Майнера, мы учитывали среднее значение (оранжевая пунктирная линия на рис. 5, 6), чтобы продемонстрировать, насколько оно близко к модели безопасного прогнозирования. Гистограммы иллюстрируют максимальное количество циклов для режимов «низко-высокий» и «высоко-низкий» при 250 °C с дробеструйным упрочнением и без него. В случаях с дробеструйным упрочнением оранжевая пунктирная линия последовательно совпадает с прогнозами безопасной модели и экспериментальными значениями усталостной долговечности. Это наблюдение особенно очевидно для сплава AA2024-T361 по сравнению со сплавом AA2024-T4.

Сложное взаимодействие ключевых переменных является причиной неточностей гипотезы Майнера в прогнозировании усталостной долговечности. Во-первых, основным недостатком теории является игнорирование начала разрушения, особенно на ранних стадиях кратковременной фазы усталостной трещины. Понимание динамики возникновения разрушения требует понимания этой фазы, охватывающей примерно 80 % усталостной долговечности, когда приложенное напряжение приближается к пределу усталости. Игнорирование этой фазы приводит к значительной недооценке общего накопленного повреждения [22], что указывает на ключевую слабость в прогностической эффективности гипотезы.

Усталостные характеристики алюминиевых сплавов AA2024-T4 и AA2024-T361 оценивались путем сравнения их срока службы, измеренного в циклах. Анализировались два ключевых показателя: среднее число циклов до разрушения ( $N_{f_{av}}$ ) и разброс значений усталостной долговечности для каждого испытания. Результаты показали, что AA2024-T361 демонстрирует значительно более долгий срок службы по сравнению с AA2024-T4, как показано на рис. 4. Превосходные характеристики сплава AA2024-T361 можно объяснить спецификой его повреждения, включающей повышенную устойчивость к возникновению и распространению трещин из-за его микроструктурных характеристик или легирующих элементов [3; 18]. Кроме того, дробеструйное упрочнение, вызвав остаточные напряжения сжатия, могло дополнительно улучшить усталостную прочность сплава AA2024-T361, сдерживая возникновение усталостных трещин. Результаты показали, что сплав AA2024-T361 находит лучшее применение там, где критически важна повышенная усталостная долговечность в условиях повышенных температур, представляет ценную информацию при выборе материалов в инженерных конструкциях, требующих долговечности и надежности.

## ВЫВОДЫ

В исследовании изучалось кумулятивное усталостное поведение сплавов AA2024-T4 и AA2024-T361 при 250 °С. Рассматривался как режим  $T=250$  °С, так и комбинированная дробеструйная обработка при той же температуре (ДУ+250 °С). Коэффициент асимметрии цикла составлял  $R=-1$ . Результаты показали, что применение кумулятивных переменных нагрузок привело к значительному снижению усталостной долговечности, особенно при повышенных температурах, однако дробеструйное упрочнение значительно повысило усталостную прочность. Кроме того, классические подходы к оценке усталостной долговечности, такие как линейный закон накопления повреждений (гипотеза Майнера) или модели, разработанные на его основе, продемонстрировали свою ограниченность в виде ненадежных и неточных прогнозов.

В результате была разработана новая модель прогнозирования усталостной долговечности, которая включает данные о последовательности нагружения, полученные из кривой  $S-N$ , а также соответствующие механические параметры. Эта модель обеспечивает консервативный, но надежный способ оценки усталостной долговечности в различных стрессовых ситуациях, возникающих при повышенных температурах или при сочетании дробеструйного упрочнения и повышенных температур. Сравнение среднего числа возможных циклов и разброса различных экспериментальных настроек, указанных выше, демонстрирует точность представленной модели, наибольшую – в режиме дробеструйного упрочнения при повышенных температурах сплава AA2024-T361.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ahcene A.S., Bey K., Mzad H. Mechanical Fatigue Test of Aluminum Composite Panel (ACP) with Aramid Nida-Core Under Cyclic Bending // *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 70. № 2. P. 1–10. DOI: [10.2478/scjme-2020-0015](https://doi.org/10.2478/scjme-2020-0015).
- Al-Obaid Y.F. Shot peening mechanics: experimental and theoretical analysis // *Mechanics of Materials*. 1995. Vol. 19. № 2-3. P. 251–260. DOI: [10.1016/0167-6636\(94\)00036-g](https://doi.org/10.1016/0167-6636(94)00036-g).
- Hou Hua, Dong Ruifeng, Tan Yuxin, Li Chenhui, Zhang Xiaoyang, Wu Li, Zhu Bin, Zhao Yuhong. Microstructural characteristics and enhanced mechanical properties of 2024 aluminum alloy resulting from shot-peening treatment // *Materials Characterization*. 2023. Vol. 206. Part A. Article number 113412. DOI: [10.1016/j.matchar.2023.113412](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.113412).
- Palmgren A.G. Die Lebensdauer von Kugellagern. Life Length of Roller Bearings or Durability of Ball Bearings // *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (ZVDI)*. 1924. Vol. 14. P. 339–341.
- Susmel L. The Modified Wöhler Curve Method calibrated by using standard fatigue curves and applied in conjunction with the Theory of Critical Distances to estimate fatigue lifetime of aluminum weldments // *International Journal of Fatigue*. 2009. Vol. 31. № 1. P. 197–212. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2008.04.004](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.04.004).
- Miner M.A. Cumulative damage in fatigue // *Journal of Applied Mechanics*. 1945. Vol. 12. № 3. P. A159–A164. DOI: [10.1115/1.4009458](https://doi.org/10.1115/1.4009458).
- Blasón S., Correia J.A.F.O., Jesus A.M.P., Calçada R.A.B., Fernandez-Canteli A. A probabilistic analysis of Miner's law for different loading conditions // *Structural Engineering and Mechanics*. 2016. Vol. 60. № 1. P. 71–90. DOI: [10.12989/sem.2016.60.1.071](https://doi.org/10.12989/sem.2016.60.1.071).
- Mahdi H.S., Faris S.T., Abed R.M., Alalkawi H.M., Nasir R. Cumulative fatigue life estimation under combined shot peening and elevated temperature for AA7001-T6 // *Diyala Journal of Engineering Sciences*. 2023. Vol. 16. № 2. P. 50–59. DOI: [10.24237/djes.2023.16204](https://doi.org/10.24237/djes.2023.16204).
- Alwin A.H., Ksibi H., Driss Z., Alalkawi H.J.M. Fatigue variable loading under combined high temperature and shot peening treatment for AA2024-T4 and AA2024-T361 // *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 73. № 1. P. 1–12. DOI: [10.2478/scjme-2023-0001](https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0001).
- Mazlan S., Yidris N., Kooloor S.S.R., Petru M. Experimental and numerical analysis of fatigue life of aluminum Al 2024-T351 at elevated temperature // *Metals*. 2020. Vol. 10. № 12. Article number 1581. DOI: [10.3390/met10121581](https://doi.org/10.3390/met10121581).
- Alwin A.H.A., Ksibi H., Driss Z., Alalkawi H.J.M. Optimization of the Shot Peening Time (SPT) in Terms of Mechanical Properties and Fatigue Life of AA2024-T4 // *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3002. № 1. Article number 070048. DOI: [10.1063/5.0206464](https://doi.org/10.1063/5.0206464).
- Al-Rubaie K.S. A general model for stress-life fatigue prediction // *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*. 2008. Vol. 39. № 6. P. 400–406. DOI: [10.1002/mawe.200800282](https://doi.org/10.1002/mawe.200800282).
- Alkawi H.J.M., Mohammed Q.K., Al-Nuami W.S. The effect of shot peening and residual stresses on cumulative fatigue damage // *Engineering and Technology Journal*. 2010. Vol. 28. № 15. P. 5055–5070. DOI: [10.30684/etj.28.15.14](https://doi.org/10.30684/etj.28.15.14).
- Kondo Y. Fatigue under variable amplitude loading // *Comprehensive Structural Integrity*. 2003. Vol. 4. P. 253–279. DOI: [10.1016/b0-08-043749-4/04029-5](https://doi.org/10.1016/b0-08-043749-4/04029-5).
- Maleki E., Bagherifard S., Unal O., Bandini M., Farrahi G.H., Guagliano M. Introducing gradient severe shot peening as a novel mechanical surface treatment // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11. № 1. Article number 22035. DOI: [10.1038/s41598-021-01152-2](https://doi.org/10.1038/s41598-021-01152-2).
- Hectors K., De Waele W. Cumulative Damage and Life Prediction Models for High-Cycle Fatigue of Metals: A Review // *Metals*. 2021. Vol. 11. № 2. Article number 204. DOI: [10.3390/met11020204](https://doi.org/10.3390/met11020204).
- Fatemi A., Yang L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials // *International Journal of Fatigue*. 1998. Vol. 20. № 1. P. 9–34. DOI: [10.1016/s0142-1123\(97\)00081-9](https://doi.org/10.1016/s0142-1123(97)00081-9).
- Li Guowei, Dong Zhicheng, Luo Tianhao, Huang Heyuan. Study on the influence of shot peening strengthening before shot peen forming on 2024-T351 aluminum alloy fatigue crack growth rate // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. № 1. Article number 5313. DOI: [10.1038/s41598-023-32616-2](https://doi.org/10.1038/s41598-023-32616-2).
- Starkey W.L., Marco S.M. Effect of Complex Stress-Time Cycles on the Fatigue Properties of Metals // *Transactions of ASME*. 1957. Vol. 79. № 6. P. 1329–1336. DOI: [10.1115/1.4013318](https://doi.org/10.1115/1.4013318).

20. Zhao Gongwei, Liu Yating, Ye Nanhai. An improved fatigue accumulation damage model based on load interaction and strength degradation // *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 156. Article number 106636. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2021.106636](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106636).
21. Hwang W., Han K.S. Cumulative Damage Models and Multi-Stress Fatigue Life Prediction // *Journal of Composite Materials*. 1986. Vol. 20. № 2. P. 125–153. DOI: [10.1177/002199838602000202](https://doi.org/10.1177/002199838602000202).
22. Hong Yan Miao, Lévesque M., Gosselin F.P. Shot peen forming pattern optimization to achieve cylindrical and saddle target shapes: The inverse problem // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2022. Vol. 36. P. 67–77. DOI: [10.1016/j.cirpj.2021.11.003](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.11.003).
23. Miller K.J., Mohamed H.J., de los Rios E.R. Fatigue damage accumulation above and below the fatigue limit // *The Behavior of Short Fatigue Cracks*. (EGF 1). London: Mechanical Engineering Publications, 1986. P. 491–511.
24. *Structural Alloys Handbook* / ed. J.M.T. Holt. West Lafayette: CINDAS/Purdue University, 1996. 580 p.
- and shot peening treatment for AA2024-T4 and AA2024-T361. *Strojnický časopis - Journal of Mechanical Engineering*, 2023, vol. 73, no. 1, pp. 1–12. DOI: [10.2478/scjme-2023-0001](https://doi.org/10.2478/scjme-2023-0001).
10. Mazlan S., Yidris N., Kolor S.S.R., Petru M. Experimental and numerical analysis of fatigue life of aluminum Al 2024-T351 at elevated temperature. *Metals*, 2020, vol. 10, no. 12, article number 1581. DOI: [10.3390/met10121581](https://doi.org/10.3390/met10121581).
11. Alwin A.H.A., Ksibi H., Driss Z., Alalkawi H.J.M. Optimization of the Shot Peening Time (SPT) in Terms of Mechanical Properties and Fatigue Life of AA2024-T4. *AIP Conference Proceedings*, 2024, vol. 3002, no. 1, article number 070048. DOI: [10.1063/5.0206464](https://doi.org/10.1063/5.0206464).
12. Al-Rubaie K.S. A general model for stress-life fatigue prediction. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 2008, vol. 39, no. 6, pp. 400–406. DOI: [10.1002/mawe.200800282](https://doi.org/10.1002/mawe.200800282).
13. Alkawi H.J.M., Mohammed Q.K., Al-Nuami W.S. The effect of shot peening and residual stresses on cumulative fatigue damage. *Engineering and Technology Journal*, 2010, vol. 28, no. 15, pp. 5055–5070. DOI: [10.30684/etj.28.15.14](https://doi.org/10.30684/etj.28.15.14).
14. Kondo Y. Fatigue under variable amplitude loading. *Comprehensive Structural Integrity*, 2003, vol. 4, pp. 253–279. DOI: [10.1016/b0-08-043749-4/04029-5](https://doi.org/10.1016/b0-08-043749-4/04029-5).
15. Maleki E., Bagherifard S., Unal O., Bandini M., Farahi G.H., Guagliano M. Introducing gradient severe shot peening as a novel mechanical surface treatment. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11, no. 1, article number 22035. DOI: [10.1038/s41598-021-01152-2](https://doi.org/10.1038/s41598-021-01152-2).
16. Hectors K., De Waele W. Cumulative Damage and Life Prediction Models for High-Cycle Fatigue of Metals: A Review. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 2, article number 204. DOI: [10.3390/met11020204](https://doi.org/10.3390/met11020204).
17. Fatemi A., Yang L. Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials. *International Journal of Fatigue*, 1998, vol. 20, no. 1, pp. 9–34. DOI: [10.1016/s0142-1123\(97\)00081-9](https://doi.org/10.1016/s0142-1123(97)00081-9).
18. Li Guowei, Dong Zhicheng, Luo Tianhao, Huang Heyuan. Study on the influence of shot peening strengthening before shot peen forming on 2024-T351 aluminum alloy fatigue crack growth rate. *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, no. 1, article number 5313. DOI: [10.1038/s41598-023-32616-2](https://doi.org/10.1038/s41598-023-32616-2).
19. Starkey W.L., Marco S.M. Effect of Complex Stress-Time Cycles on the Fatigue Properties of Metals. *Transactions of ASME*, 1957, vol. 79, no. 6, pp. 1329–1336. DOI: [10.1115/1.4013318](https://doi.org/10.1115/1.4013318).
20. Zhao Gongwei, Liu Yating, Ye Nanhai. An improved fatigue accumulation damage model based on load interaction and strength degradation. *International Journal of Fatigue*, 2022, vol. 156, article number 106636. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2021.106636](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106636).
21. Hwang W., Han K.S. Cumulative Damage Models and Multi-Stress Fatigue Life Prediction. *Journal of Composite Materials*, 1986, vol. 20, no. 2, pp. 125–153. DOI: [10.1177/002199838602000202](https://doi.org/10.1177/002199838602000202).
22. Hong Yan Miao, Lévesque M., Gosselin F.P. Shot peen forming pattern optimization to achieve cylindrical and saddle target shapes: The inverse problem. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2022, vol. 36, pp. 67–77. DOI: [10.1016/j.cirpj.2021.11.003](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.11.003).

## REFERENCES

1. Ahcene A.S., Bey K., Mzad H. Mechanical Fatigue Test of Aluminum Composite Panel (ACP) with Aramid Nida-Core Under Cyclic Bending. *Strojnický časopis - Journal of Mechanical Engineering*, 2020, vol. 70, no. 2, pp. 1–10. DOI: [10.2478/scjme-2020-0015](https://doi.org/10.2478/scjme-2020-0015).
2. Al-Obaid Y.F. Shot peening mechanics: experimental and theoretical analysis. *Mechanics of Materials*, 1995, vol. 19, no. 2-3, pp. 251–260. DOI: [10.1016/0167-6636\(94\)00036-g](https://doi.org/10.1016/0167-6636(94)00036-g).
3. Hou Hua, Dong Ruifeng, Tan Yuxin, Li Chenhui, Zhang Xiaoyang, Wu Li, Zhu Bin, Zhao Yuhong. Microstructural characteristics and enhanced mechanical properties of 2024 aluminum alloy resulting from shot-peening treatment. *Materials Characterization*, 2023, vol. 206, part A, article number 113412. DOI: [10.1016/j.matchar.2023.113412](https://doi.org/10.1016/j.matchar.2023.113412).
4. Palmgren A.G. Die Lebensdauer von Kugellagern. *Life Length of Roller Bearings or Durability of Ball Bearings*. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (ZVDI)*, 1924, vol. 14, pp. 339–341.
5. Susmel L. The Modified Wöhler Curve Method calibrated by using standard fatigue curves and applied in conjunction with the Theory of Critical Distances to estimate fatigue lifetime of aluminum weldments. *International Journal of Fatigue*, 2009, vol. 31, no. 1, pp. 197–212. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2008.04.004](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2008.04.004).
6. Miner M.A. Cumulative damage in fatigue. *Journal of Applied Mechanics*, 1945, vol. 12, no. 3, pp. A159–A164. DOI: [10.1115/1.4009458](https://doi.org/10.1115/1.4009458).
7. Blasón S., Correia J.A.F.O., Jesus A.M.P., Calcada R.A.B., Fernandez-Canteli A. A probabilistic analysis of Miner's law for different loading conditions. *Structural Engineering and Mechanics*, 2016, vol. 60, no. 1, pp. 71–90. DOI: [10.12989/sem.2016.60.1.071](https://doi.org/10.12989/sem.2016.60.1.071).
8. Mahdi H.S., Faris S.T., Abed R.M., Alalkawi H.M., Nasir R. Cumulative fatigue life estimation under combined shot peening and elevated temperature for AA7001-T6. *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 2023, vol. 16, no. 2, pp. 50–59. DOI: [10.24237/djes.2023.16204](https://doi.org/10.24237/djes.2023.16204).
9. Alwin A.H., Ksibi H., Driss Z., Alalkawi H.J.M. Fatigue variable loading under combined high temperature

- nal of Manufacturing Science and Technology*, 2022, vol. 36, pp. 67–77. DOI: [10.1016/j.cirpj.2021.11.003](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.11.003).
23. Miller K.J., Mohamed H.J., de los Rios E.R. Fatigue damage accumulation above and below the fatigue limit. *The Behavior of Short Fatigue Cracks. (EGF 1)*. London, Mechanical Engineering Publications, 1986, pp. 491–511.
24. Holt J.M.T., ed. *Structural Alloys Handbook*. West Lafayette, CINDAS/Purdue University Publ., 1996. 580 p.

## Predictive fatigue life modelling for aluminum alloys winder high temperature and shot peening interact

Allawi H. Alwin<sup>1,3</sup>, PhD (Mechanical Engineering),  
Laboratory of Electro-Mechanic Systems (LASEM)

Hatem Ksibi<sup>2,4</sup>, Professor, permanent member of the Materials, Environment and Energy Laboratory,  
Faculty of Sciences of Gafsa

<sup>1</sup>National School of Engineers of Sfax (ENIS), Sfax (Tunisia)

<sup>2</sup>Sfax Preparatory Engineering Institute (IPEIS), Sfax (Tunisia)

\*E-mail: [hatem.ksibi@ipeis.rnu.tn](mailto:hatem.ksibi@ipeis.rnu.tn)

<sup>3</sup>ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1015-2476>

<sup>4</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4144-9958>

Received 18.04.2024

Revised 22.05.2024

Accepted 11.09.2024

**Abstract:** Enhancing the surface quality of shells subjected to high stress is a major task. A variety of procedures are employed for dealing with this issue. Shot peening is particularly common for aluminium alloys made. In fact, the main method for assessing the surface's durability under consideration is fatigue testing using standard specimens over several cycles. This paper investigates the performance of aluminium alloys under high-temperature exposure, examining their behaviour with and without shot peening-induced hardening. In fact, the study focuses on the fatigue behaviour of aluminium alloys 2024-T4 and 2024-T361 at 250 °C. Experiments on standard-sized specimens were conducted at both room temperature and 250 °C to evaluate how temperature affects fatigue life. The findings were consistent with previously published data, providing useful insights into the behaviour of these alloys at extreme temperatures. Additionally, a mathematical model was developed, integrating the Stress – Number of cycles curve, loading sequence, temperature, and surface hardness from shot peening. This model was compared with Miner's rule to assess its predictive accuracy. The results show that the new model provides more accurate predictions of fatigue life than Miner's rule, thereby improving the reliability and safety of components in high-temperature applications. By offering precise fatigue life predictions, this research aids in the design and development of more durable aluminium alloy components, ensuring optimal performance and safety in challenging operating environments.

**Keywords:** shot peening; predictive fatigue life; aluminium alloys; AA2024-T4; AA2024-T361; high temperature exposure; variable loading.

**For citation:** Alwin A.H., Ksibi H. Predictive fatigue life modeling for aluminium alloys winder high temperature and shot peening interact. *Frontier Materials & Technologies*, 2024, no. 4, pp. 111–122. DOI: 10.18323/2782-4039-2024-4-70-10.