

## Моделирование влияния поверхностных дефектов на поведение алюминиевого сплава в условиях циклических нагрузок

© 2022

*Алмазова Лиана Алмазовна*<sup>\*1</sup>, студент*Седова Ольга Сергеевна*<sup>2</sup>, кандидат физико-математических наук,

доцент кафедры вычислительных методов механики деформируемого тела

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург (Россия)

\*E-mail: [st080595@student.spbu.ru](mailto:st080595@student.spbu.ru)<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8695-3598><sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9097-8501>

Поступила в редакцию 04.08.2021

Принята к публикации 15.03.2022

**Аннотация:** Алюминий и его сплавы, в частности сплав Al–Si–Mg, широко применяются в различных областях промышленности и техники благодаря своим механическим свойствам. При этом дефекты, образующиеся в процессе литья, оказывают пагубное воздействие на поведение рассматриваемого сплава в условиях циклических нагрузок. Поэтому актуальны исследования, направленные на изучение влияния поверхностных дефектов на усталостную прочность материала. В статье представлено численное исследование, основанное на методе конечных элементов, целью которого является оценка влияния взаимодействия дефектов сложной формы на напряжении исследуемого образца алюминиевого сплава Al–Si–Mg. Построенная модель сложного дефекта состоит из основного дефекта полусферической формы и вторичного дефекта на дне основного. Поведение материала при циклических нагрузках описывается моделью Шабоса. Численное решение построено в пакете ANSYS Workbench. Было выдвинуто предположение, что рассматриваемую сложную комбинацию дефектов возможно аппроксимировать эквивалентным упрощенным дефектом. Показано, что максимальные значения напряжения Мизеса для дефектов сложной формы достигаются на месте стыка вторичного дефекта с основным. В случае эквивалентного дефекта максимальные значения наблюдаются на дне дефекта и по краям. Проведена сравнительная оценка погрешности, полученной с использованием эквивалентного дефекта, по сравнению со случаями трех дефектов сложной формы и трех дефектов полусферической формы без дополнительного (вторичного) повреждения. Данная оценка показала, что при сложной форме дефектов модель эквивалентного дефекта дает погрешность в 14,5 %, что на 6,5 % больше, чем в случае полусферических дефектов без вторичных повреждений на дне.

**Ключевые слова:** алюминиевый сплав; напряженно-деформированное состояние; поверхностный дефект; пitting; локальная коррозия; взаимодействие дефектов; циклические нагрузки; модель Шабоса; напряжения Мизеса.

**Благодарности:** Исследования были проведены с использованием вычислительных ресурсов Ресурсного центра «Вычислительный центр СПбГУ».

Статья подготовлена по материалам докладов участников X Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2021), Тольятти, 13–17 сентября 2021 года.

**Для цитирования:** Алмазова Л.А., Седова О.С. Моделирование влияния поверхностных дефектов на поведение алюминиевого сплава в условиях циклических нагрузок // Frontier Materials and Technologies. 2022. № 1. С. 7–14. DOI: 10.18323/2782-4039-2022-1-7-14.

### ВВЕДЕНИЕ

Для прогнозирования образования существенных повреждений в элементах приборов и различных конструкций изучается влияние микроструктуры, микро- и макродефектов, шероховатостей поверхности на поведение материалов. Причинами появления повреждений могут служить как воздействие окружающей среды, так и рабочие нагрузки, возникающие в процессе эксплуатации. Но зачастую дефекты возникают уже на этапе производства деталей.

Даже незначительные повреждения на поверхности и внутри тел могут спровоцировать высокую локальную концентрацию напряжений, вследствие которых рассматриваемые конструкции разрушаются и/или выходят из строя значительно быстрее. Последние десятилетия интенсивно изучалось влияние микродефектов на прочность различных объектов. В частности, проведено множество исследований относительно металлических объектов. В трудах Ю. Мураками была пред-

ставлена модель усталостной прочности материалов с дефектами (метод  $\sqrt{\text{area}}$ ). Согласно данной модели одним из наиболее важных параметров, влияющих на прочность, является размер дефекта. Предложенная Ю. Мураками модель обширно используется для исследования усталостной прочности металлов [1].

Влияние единичных дефектов на напряженно-деформированное состояние тел изучалось во многих исследованиях для поверхностных и внутренних дефектов. Однако очевидно, что реальные материалы могут содержать несколько дефектов, которые, находясь в непосредственной близости, начинают взаимодействовать между собой. В частности, дефекты, вызванные производственной деятельностью, а именно дефекты литья или дефекты сварки, коррозионные повреждения, шероховатость поверхности, микровключения, дислокации, часто бывают близко расположены друг к другу, что приводит к взаимодействию полей напряжений и существенно снижает предел прочности материала [1; 2].

Среди уже имеющихся результатов, полученных в процессе изучения взаимодействия нескольких дефектов, одним из наиболее важных является понятие критического расстояния [1]. Данная концепция говорит о том, что если между двумя дефектами имеется достаточное пространство для того, чтобы можно было поместить еще один дефект, размеры которого совпадают с размерами меньшего из изначально имеющихся дефектов, то максимальный коэффициент концентрации напряжений примерно равен коэффициенту, отвечающему большему дефекту [1; 3].

Причиной возникновения дефектов может служить взаимодействие с окружающей средой, в частности коррозия для металлических объектов. Точечная коррозия (питтинг) представляет собой локализованную коррозию, возникающую на поверхности в основном в местах различных дефектов покрытия, сварочных швов, болтовых соединений или в местах неоднородности сплавов. Питтинговые повреждения зачастую очень сложно обнаружить ввиду их малых размеров и продуктов коррозии, их маскирующих. Кроме того, точечная коррозия является интенсивной формой коррозии, благодаря чему разрушение деталей происходит довольно внезапно и быстро. А так как полное предотвращение образования питтинговых повреждений невозможно, изучение процесса локальной коррозии и его влияния на прочность материалов и конструкций имеет значительную практическую ценность.

В работах [4–6] отмечено, что питтинги на поверхности сталей и алюминиевых сплавов имеют сложную форму, в которой можно условно выделить основной и дополнительный, или вторичный, питтинг на дне основного (рис. 1). Проведенные исследования по моделированию напряженно-деформированного состояния конструкций, содержащих один коррозионный дефект такой сложной формы, показывают, что влияние дополнительного питтинга приводит к значительному росту коэффициента концентрации напряжений [4; 5; 7].

Широкое применение при оценке прочности конструкций, подверженных циклическим нагрузкам, получили модели Ю.Г. Коротких [8; 9], В.С. Бондаря [10] и Ж.-Л. Шабоша [11; 12], которые успели хорошо себя зарекомендовать на широком разнообразии задач и рассматриваемых сплавов. Постепенно развиваются новые, более сложные модели, описывающие пластическое деформирование материалов [13; 14]. Сложными задачами в этой области являются экспериментальное определение констант материалов, а также программная

реализация новых моделей, не содержащая пока в большинстве коммерческих пакетов, таких как ANSYS, Abaqus и др. Метод конечных элементов показал свою эффективность в задачах численной оценки напряженно-деформированного состояния в окрестности коррозионных дефектов на поверхности тел [7; 15] при анализе прочности тел с внутренними дефектами [16; 17]. В работах [18–20] метод конечных элементов успешно использован для расчета напряженно-деформированного состояния материалов с близкорасположенными дефектами.

Отметим, что в ситуациях, когда дефекты расположены в непосредственной близости друг к другу, очень сложно определить фактические размеры и форму повреждений [21; 22]. Благодаря этому являются актуальными исследования, направленные на поиск эквивалентных форм, которые могли бы аппроксимировать подобные сложные совокупности дефектов.

Результаты экспериментов [23] свидетельствуют о том, что чем сложнее форма микропор, содержащихся в образцах литого сплава AS7G06-T6, тем сильнее дефекты влияют на напряженно-деформированное состояние объекта. Аналогичные результаты были получены численными методами для алюминиевых сплавов в работе [24]. Очевидно, что изучать и анализировать подобные дефекты довольно затруднительно. В связи с этим были проведены численные исследования над реальными дефектами литья, в результате которых было установлено, что разница при оценке концентрации напряжения между изучаемыми дефектами реальной формы и «эквивалентными» дефектами упрощенной сферической формы составляет примерно 10 % [23; 25; 26]. Вследствие этого был сделан вывод о возможности аппроксимации реальных дефектов в сплавах сферами тех же размеров.

В работе [20] рассматривается новый подход к изучению напряжения в окрестности нескольких сферических дефектов в алюминиевом сплаве. Авторы исследовали различные варианты расстояний между дефектами и различное расположение дефектов в образце – вдоль оси нагрузки и перпендикулярно ей. Исследование проводилось с использованием метода конечных элементов и применением модели Ж.-Л. Шабоша [11; 12]. В результате было показано, что довольно сложную совокупность дефектов можно аппроксимировать одним «эквивалентным» дефектом более простой формы, который значительно легче исследовать, с сохранением тех же значений напряжений в окрестности этой простой формы [20].

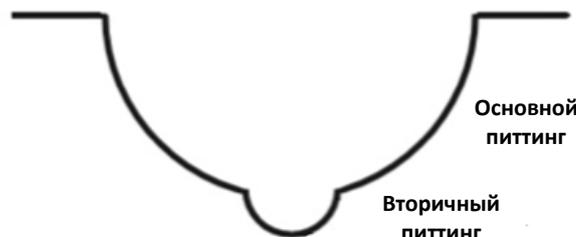


Рис. 1. Модель рассматриваемого сложного дефекта  
Fig. 1. The model of a complex-shaped defect under the study

Настоящая работа рассматривает гипотезу, что совокупность дефектов сложной формы, в которой можно условно выделить и вторичный питтинг на дне основного, также можно аппроксимировать более простой формой. С этой целью были построены необходимые геометрии, а для численного анализа использовался метод конечных элементов, реализуемый в пакете ANSYS, поведение материала описывается моделью нелинейного кинематического упрочнения.

Цель работы – оценка разницы значений напряжений в окрестности дефектов сложной формы и эквивалентного дефекта для сплава Al–Si–Mg в условиях циклического нагружения.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

### Параметры материала

С целью изучения воздействия нескольких дефектов на прочность сплава Al–Si–Mg, был использован AS7G06 с T6 посттермической обработкой. Химический состав данного материала и его основные механические свойства, полученные в исследовании [3], показаны в таблице 1 и таблице 2 соответственно.

Параметры материала заданы в пакете ANSYS Workbench в разделе Engineering Data. Поведение материала описывается моделью Шабоса с комбинированным изотропно-кинематическим упрочнением, реализованной в ANSYS Workbench (Engineering Data Sources → Plasticity → Chaboche kinematic hardening). Константы, характеризующие рассматриваемый сплав AS7G06, необходимые для расчетов с использованием модели Шабоса, приведены в [20]:  $C=127,5$  ГПа;  $\gamma=1,3$ .

### Конечно-элементный анализ

**Геометрические параметры рассмотренных моделей.** Для исследования поставленной задачи использовался пакет программ ANSYS Workbench. Геометрическая модель была построена в пакете ANSYS SpaceClaim. Рассматриваемой элементарной моделью

был взят цилиндр с диаметром 10 мм и высотой 20 мм, соответствующий рабочей части образцов эксперимента. Для иллюстрации эксперимента было построено три основных сферических дефекта, радиусы которых равны  $R=0,32$  мм, с дополнительными (вторичными) дефектами на дне, их радиусы  $r=0,08$  мм. Дефекты расположены в середине образца вдоль поперечного сечения, т. е. на окружности, расстояние между дефектами 0,1 мм. Иные расположения дефектов относительно друг друга или относительно объекта в целом рассматриваются в ряде других работ [3; 20], где показано, что взаимодействие дефектов наблюдается именно в случае расположения вдоль поперечного сечения. В силу симметрии была построена геометрия  $\frac{1}{4}$  от рассматриваемой модели (рис. 2).

В качестве второй геометрии рассмотрен аналогичный цилиндр, моделирующий рабочую часть образца. Однако в данном случае на месте трех сферических дефектов построим один дефект упрощенной формы – «эквивалентный» дефект, а именно многоугольник с длиной, равной  $6R$ , шириной  $2R$  и высотой  $2R+r$ , где  $R$  – радиус «больших» дефектов;  $r$  – радиус вторичных повреждений. Предполагаемый эквивалентный дефект также имеет закругление края с радиусом, равным  $0,1R$ , для того чтобы избежать высоких концентраций напряжений.

**Граничные условия.** На рассматриваемые геометрические модели с тремя дефектами сложной формы и одним эквивалентным дефектом наложены следующие граничные условия (рис. 3):

- на поперечное сечение образца, соответствующее границе рабочей части образца, действует сила  $\sigma$ , соответствующая амплитуде в циклических испытаниях;
- на плоскостях сечения, ограничивающих рассматриваемую  $\frac{1}{4}$  образца, действует условие симметрии.

Использованные значения приложенной силы  $\sigma$  приведены в таблице 3.

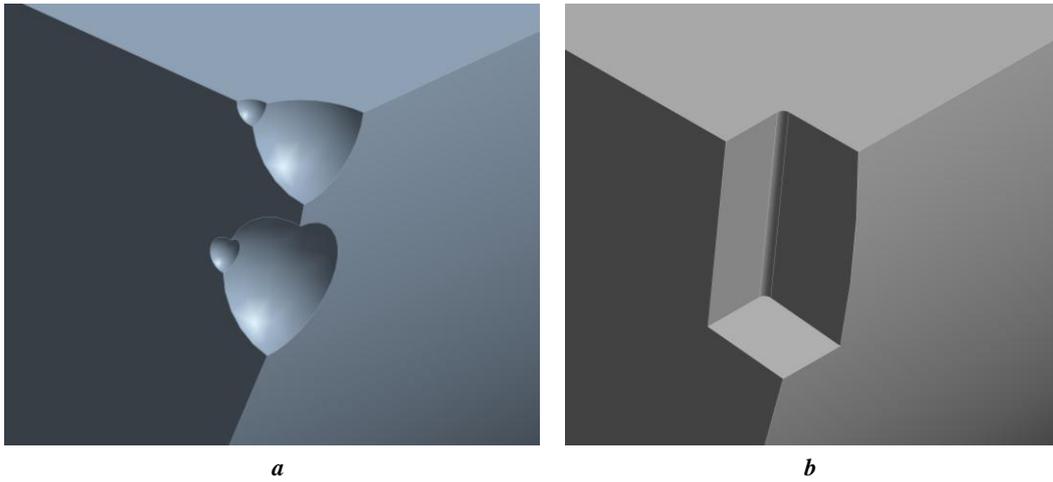
**Построение конечно-элементной сетки.** Для решения задачи методом конечных элементов рассмотренные геометрические модели были разбиты на элементы. В работе использовалась сетка, состоящая из тетраэдров, построенная по принципу первичного

**Таблица 1.** Химический состав AS7G06  
**Table 1.** Chemical composition of AS7G06

Элемент	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ni	Zn	Pb	Ti
%	7,00	0,56	0,097	<0,015	<0,03	<0,01	<0,01	<0,003	0,13

**Таблица 2.** Механические свойства AS7G06  
**Table 2.** Mechanical properties of AS7G06

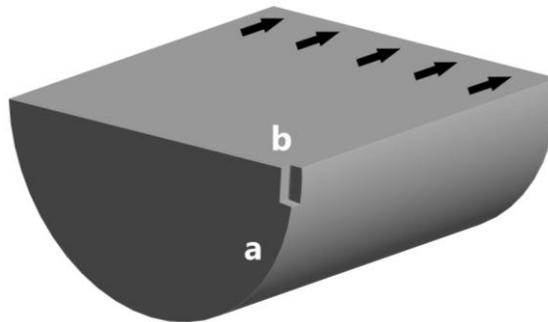
$E$ (модуль Юнга), ГПа	$R_{02}$ (предел упругости), МПа	$R_m$ (предел прочности), МПа	коэффициент Пуассона $\nu$ , %
73	275	335	0,33



**Рис. 2.** Построенные модели с полусферическими дефектами, на дне которых вторичные дефекты (а), и предполагаемым эквивалентным дефектом (b)  
**Fig. 2.** The developed models with hemispherical defects, which have secondary defects (a) at their bottoms, and the suspected equivalent defect (b)

**Таблица 3.** Максимальные значения напряжений при различных уровнях номинально приложенных напряжений  $\sigma$ , МПа  
**Table 3.** Peak stresses at different levels of nominally applied stresses  $\sigma$ , MPa

Уровень напряжений, МПа	60	65	70	75	80	85
Три полусферических дефекта	220,0	238,3	256,6	274,9	293,2	288,2
Эквивалентный дефект	252,1	273,1	271,4	281,7	297,4	313,2

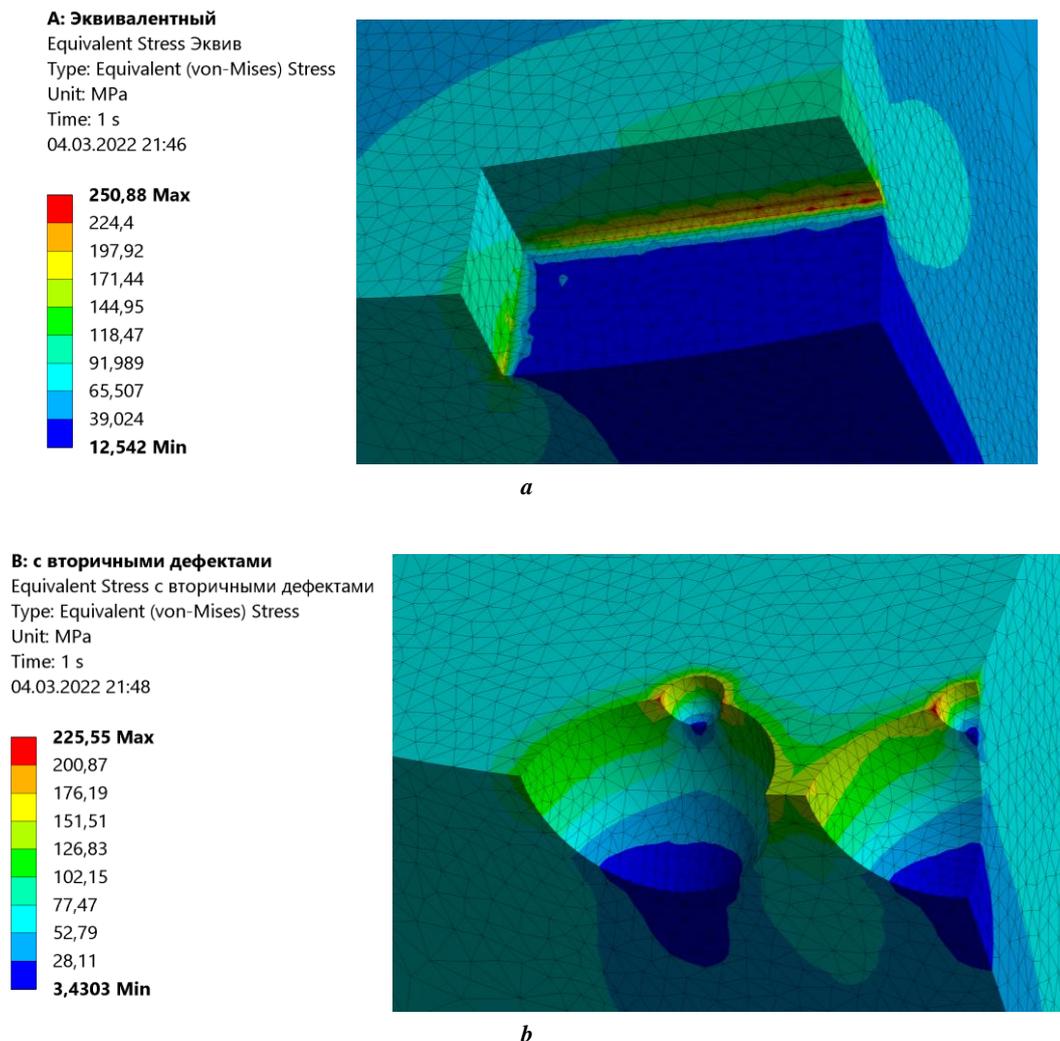


**Рис. 3.** Геометрическая модель с дефектом эквивалентной формы.  
*a, b – плоскости с условием симметрии, стрелки показывают плоскость приложения и направление силы*  
**Fig. 3.** A geometrical model with the equivalent-form defect:  
*a, b – the planes with the symmetry condition; arrows indicate the plane of force application and direction*

разбиения на конечные элементы поверхностей тела и последующего разбиения объема, базирующегося на построенной ранее поверхностной сетке. Данный метод является более надежным для специфики нашей геометрии, в частности, он имеет высокое качество построения, т. е. в нем отсутствуют проблемные зоны, которые являются следствием некорректного построения в случае мелких деталей. При этом так как окрестность дефектов является вероятным местом concentra-

ции напряжений, к поверхности дефектов, в том числе и в форме многоугольника, и питтинговых повреждений, дополнительно был применен метод задания размера элемента на поверхности, позволяющий задать мелкую сетку в указанных областях.

Для оценки сходимости решения были проведены расчеты с несколькими разными сетками. Погрешность составила 3 %. Используемая сетка конечных элементов приведена на рис. 4.



**Рис. 4.** Распределение напряжений на рассматриваемых моделях:  
*a* – в окрестности эквивалентного дефекта; *b* – в окрестности кластера дефектов сложной формы  
**Fig. 4.** Stress distribution in treated models:  
*a* – in the vicinity of an equivalent defect; *b* – in the vicinity of a cluster of the complex-shaped defects

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования были построены распределения напряжений Мизеса для геометрии с тремя дефектами сложной формы и геометрии с одним эквивалентным дефектом. Для каждой рассмотренной модели были проведены расчеты при различных уровнях приложения номинальных напряжений  $\sigma$ . Полученные при расчетах максимальные значения напряжения Мизеса для рассмотренных геометрических моделей и значений нагрузки приведены в таблице 3.

На рис. 4 изображены распределения напряжений для исследуемых геометрий.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из полученных результатов можно сделать вывод, что для дефектов более сложной формы, в частности полусферических дефектов, на дне которых присутствуют вторичные повреждения, модель эквивалентного дефекта, описанная в [20], дает максимальную погреш-

ность в 14,5 %. Увеличение значения погрешности по сравнению с погрешностью, полученной в работе [20], в которой исследовались полусферические дефекты без вторичных дефектов на дне, можно объяснить тем, что вторичные питтинги на дне основных дефектов приводят к большему увеличению значения напряжения, чем увеличение глубины в эквивалентном дефекте. Это подтверждается тем фактом, что напряжения, получаемые для геометрии с вторичными повреждениями, значительно больше, чем для полусферических дефектов, рассматриваемых в [20].

Изображения распределения напряжений для исследуемых геометрий (рис. 4) наглядно показывают, что в случае трех полусферических дефектов сложной формы максимальное значение напряжения Мизеса возникает на стыке вторичного дефекта с основным. При этом в пространстве между основными дефектами также наблюдаются высокие напряжения, хотя значения их ниже, чем максимальное на стыке вторичного и основного дефекта. Отметим, что исследования [19; 20], в которых были рассмотрены дефекты эллиптической

или сферической формы без вторичных дефектов, показали, что при взаимодействии дефектов простой формы максимальные значения напряжений достигаются в месте острых краев между дефектами. Таким образом, наше исследование случая трех дефектов сложной формы показывает, что наличие вторичных дефектов на дне основных приводит к качественно другой картине распределения напряжений по сравнению со случаем дефектов простой формы. В случае же с эквивалентным дефектом максимальное напряжение зафиксировано на дне дефекта и его углах, что соответствует результатам, полученным в [20].

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные напряжения для случая поверхностных дефектов сложной формы выше, чем для аналогичных полусферических дефектов без дополнительного дефекта на дне.

Показано, что разница максимальных значений напряжений в окрестности трех дефектов сложной формы и эквивалентного дефекта достигает 14,5 %, что существенно выше, чем погрешность в случае полусферических дефектов без дополнительного дефекта на дне.

Максимальное значение напряжения Мизеса возникает на стыке вторичного дефекта с основным. При этом в пространстве между основными дефектами также наблюдаются высокие напряжения, хотя значения их ниже, чем максимальное на стыке вторичного и основного дефекта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Murakami Y. Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions. Chennai: Academic Press, 2019. 734 p. DOI: [10.1016/C2016-0-05272-5](https://doi.org/10.1016/C2016-0-05272-5).
- Leitner M., Murakami Y., Farajian M., Remes H., Stoschka M. Fatigue Strength Assessment of Welded Mild Steel Joints Containing Bulk Imperfections // Metals. 2018. Vol. 8. № 5. Article number 306. DOI: [10.3390/met8050306](https://doi.org/10.3390/met8050306).
- Mu P., Nadot Y., Serrano-Munoz I., Chabod A. Influence of complex defect on cast AS7G06-T6 under multiaxial fatigue loading // Engineering Fracture Mechanics. 2014. Vol. 123. P. 148–162. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2014.02.012](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.02.012).
- Cerit M., Genel K., Eksi S. Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit // Engineering failure analysis. 2009. Vol. 16. № 7. P. 2467–2472. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2009.04.004](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.04.004).
- Zhao W., Huang Y.F., Ye X.B., Hu B.R., Liu J.Z., Chen L.J. Correlation between the Geometric Parameters of Corrosion Pit and Stress Concentration Factor // Applied Mechanics and Materials. 2013. Vol. 327. P. 156–160. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.327.156](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.327.156).
- Genel K., Demirkol M., Gülmez T. Corrosion fatigue behaviour of ion nitrided AISI 4140 steel // Materials Science and Engineering A. 2000. Vol. 288. № 1. P. 91–100. DOI: [10.1016/S0921-5093\(00\)00835-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00835-2).
- Cerit M. Corrosion pit-induced stress concentration in spherical pressure vessel // Thin-Walled Structures. 2019. Vol. 136. P. 106–112. DOI: [10.1016/j.tws.2018.12.014](https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.12.014).
- Митенков Ф.М., Волков И.А., Игумнов Л.А., Каплиенко А.В., Коротких Ю.Г., Панов В.А. Прикладная теория пластичности. М.: Физматлит, 2015. 282 с.
- Волков И.А., Игумнов Л.А., Коротких Ю.Г. Прикладная теория вязкопластичности. Н. Новгород: Нижегородский университет имени Н.И. Лобачевского, 2015. 318 с.
- Бондарь В.С., Даншин В.В., Кандратенко А.А. Вариант теории термовязкопластичности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2016. № 1. С. 39–56. DOI: [10.15593/perm.mech/2016.1.03](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.1.03).
- Chaboche J.L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories // International Journal of Plasticity. 2008. Vol. 24. № 10. P. 1642–1692. DOI: [10.1016/j.ijplas.2008.03.009](https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2008.03.009).
- Chaboche J.L., Kanouté P., Azzouz F. Cyclic inelastic constitutive equations and their impact on the fatigue life predictions // International Journal of Plasticity. 2012. Vol. 35. P. 44–66. DOI: [10.1016/j.ijplas.2012.01.010](https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.01.010).
- Бондарь В.С., Абашев Д.Р. Некоторые особенности процессов монотонных и циклических нагружений. Эксперимент и моделирование // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 2. С. 25–34. DOI: [10.15593/perm.mech/2019.2.03](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.2.03).
- Горохов В.А. Развитие модели пластичности с комбинированным упрочнением для исследования процессов деформирования конструкционных материалов при различных режимах малоцикловых нагружений // Проблемы прочности и пластичности. 2018. Т. 80. № 2. С. 180–193. DOI: [10.32326/1814-9146-2018-80-2-180-193](https://doi.org/10.32326/1814-9146-2018-80-2-180-193).
- Седова О.С., Хакназарова Л.А. Расчет напряжений в толстостенном сферическом элементе с наружной выемкой // Процессы управления и устойчивость. 2014. Т. 1. № 1. С. 212–217. DOI: [10.18323/2073-5073-2020-2-68-73](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2020-2-68-73).
- Vakaeva A.B., Krasnitckii S.A., Smirnov A.M., Grekov M.A., Gutkin M.Y. Stress concentration and distribution at triple junction pores of three-fold symmetry in ceramics // Reviews on Advanced Materials Science. 2018. Vol. 57. № 1. P. 63–71. DOI: [10.1515/rams-2018-0048](https://doi.org/10.1515/rams-2018-0048).
- Вакаева А.Б., Греков М.А. Напряженно-деформированное состояние упругого тела с почти круговым отверстием при учете поверхностного напряжения // Процессы управления и устойчивость. 2015. Т. 2. № 1. С. 125–130.
- Åman M., Berntsson K., Marquis G. An efficient stress intensity factor evaluation method for intersecting arbitrary shaped 3D cracks // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. 2020. Vol. 109. Article number 102767. DOI: [10.1016/j.tafmec.2020.102767](https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102767).
- Okulova D.D., Sedova O.S., Pronina Y.G. The Effect of Surface Defects Interaction on the Strength of a Pressurised Spherical Shell // Procedia Structural Integrity. 2021. Vol. 33. № C. P. 1055–1064. DOI: [10.1016/j.prostr.2021.10.117](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.117).

20. Ben Ahmed A., Houria M.I., Fathallah R., Sidhom H. The effect of interacting defects on the HCF behavior of Al-Si-Mg aluminum alloys // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 779. P. 618–629. DOI: [10.1016/j.jallcom.2018.11.282](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.282).
21. Yamashita Y., Murakami T., Mihara R., Okada M., Murakami Y. Defect analysis and fatigue design basis for Ni-based Superalloy 718 manufactured by selective laser melting // *International Journal of Fatigue*. 2018. Vol. 117. P. 485–495. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2018.08.002](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.08.002).
22. Beretta S., Romano S. A comparison of fatigue strength sensitivity to defects for materials manufactured by AM or traditional processes // *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 94. P. 178–191. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2016.06.020](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.06.020).
23. Le V.D., Saintier N., Morel F., Bellett D., Osmond P. Investigation of the effect of porosity on the high cycle fatigue behaviour of cast Al-Si alloy by X-ray microtomography // *International Journal of Fatigue*. 2018. Vol. 106. P. 24–37. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2017.09.012](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.09.012).
24. Ben Ahmed A., Nasr A., Bahloul A., Fathallah R. The impact of defect morphology, defect size, and SDAS on the HCF response of A356-T6 alloy // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. № 1. P. 1113–1125. DOI: [10.1007/s00170-017-0192-6](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0192-6).
25. Serrano-Munoz I., Buffiere J.Y., Mokso R., Verdu C., Nadot Y. Location, location & size: defects close to surfaces dominate fatigue crack initiation // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Article number 45239. DOI: [10.1038/srep45239](https://doi.org/10.1038/srep45239).
26. Luetje M., Wicke M., Bacaicoa I., Brueckner-Foit A., Geisert A., Fehlbier M. 3D characterization of fatigue damage mechanisms in a cast aluminum alloy using X-ray tomography // *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 103. P. 363–370. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2017.06.020](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.06.020).
- REFERENCES**
1. Murakami Y. *Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions*. Chennai, Academic Press Publ., 2019. 734 p. DOI: [10.1016/C2016-0-05272-5](https://doi.org/10.1016/C2016-0-05272-5).
2. Leitner M., Murakami Y., Farajian M., Remes H., Stoschka M. Fatigue Strength Assessment of Welded Mild Steel Joints Containing Bulk Imperfections. *Metals*, 2018, vol. 8, no. 5, article number 306. DOI: [10.3390/met8050306](https://doi.org/10.3390/met8050306).
3. Mu P., Nadot Y., Serrano-Munoz I., Chabod A. Influence of complex defect on cast AS7G06-T6 under multiaxial fatigue loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, vol. 123, pp. 148–162. DOI: [10.1016/j.engfracmech.2014.02.012](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2014.02.012).
4. Cerit M., Genel K., Eksi S. Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit. *Engineering failure analysis*, 2009, vol. 16, no. 7, pp. 2467–2472. DOI: [10.1016/j.engfailanal.2009.04.004](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.04.004).
5. Zhao W., Huang Y.F., Ye X.B., Hu B.R., Liu J.Z., Chen L.J. Correlation between the Geometric Parameters of Corrosion Pit and Stress Concentration Factor. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 327, pp. 156–160. DOI: [10.4028/www.scientific.net/AMM.327.156](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.327.156).
6. Genel K., Demirkol M., Gülmez T. Corrosion fatigue behaviour of ion nitrided AISI 4140 steel. *Materials Science and Engineering A*, 2000, vol. 288, no. 1, pp. 91–100. DOI: [10.1016/S0921-5093\(00\)00835-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(00)00835-2).
7. Cerit M. Corrosion pit-induced stress concentration in spherical pressure vessel. *Thin-Walled Structures*, 2019, vol. 136, pp. 106–112. DOI: [10.1016/j.tws.2018.12.014](https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.12.014).
8. Mitenkov F.M., Volkov I.A., Igumnov L.A., Kaplienko A.V., Korotkikh Yu.G., Panov V.A. *Prikladnaya teoriya plastichnosti* [Applied theory of plasticity]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2015. 282 p.
9. Volkov I.A., Igumnov L.A., Korotkikh Yu.G. *Prikladnaya teoriya vyazkoplastichnosti* [Applied Theory of Viscoplasticity]. Nizhniy Novgorod, Nizhnegorodskiy universitet imeni N.I. Lobachevskogo Publ., 2015. 318 p.
10. Bondar V.S., Danshin V.V., Kandratenko A.A. Variant of thermoviscoplasticity theory. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2016, no. 1, pp. 39–56. DOI: [10.15593/perm.mech/2016.1.03](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.1.03).
11. Chaboche J.L. A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories. *International Journal of Plasticity*, 2008, vol. 24, no. 10, pp. 1642–1692. DOI: [10.1016/j.ijplas.2008.03.009](https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2008.03.009).
12. Chaboche J.L., Kanouté P., Azzouz F. Cyclic inelastic constitutive equations and their impact on the fatigue life predictions. *International Journal of Plasticity*, 2012, vol. 35, pp. 44–66. DOI: [10.1016/j.ijplas.2012.01.010](https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.01.010).
13. Bondar V.S., Abashev D.R. Some features of monotonic and cyclic loadings. Experiment and modeling. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2019, no. 2, pp. 25–34. DOI: [10.15593/perm.mech/2019.2.03](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2019.2.03).
14. Gorokhov V.A. Developing a plasticity model with combined hardening for studying deformation processes in structural materials under various low-cycle loading modes. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, 2018, vol. 80, no. 2, pp. 180–193. DOI: [10.32326/1814-9146-2018-80-2-180-193](https://doi.org/10.32326/1814-9146-2018-80-2-180-193).
15. Sedova O.S., Khaknazarova L.A. Stress analysis of a notched thick spherical member. *Protsessy upravleniya i ustoychivost*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 212–217. DOI: [10.18323/2073-5073-2020-2-68-73](https://doi.org/10.18323/2073-5073-2020-2-68-73).
16. Vakaeva A.B., Krasnitckii S.A., Smirnov A.M., Grekov M.A., Gutkin M.Y. Stress concentration and distribution at triple junction pores of three-fold symmetry in ceramics. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2018, vol. 57, no. 1, pp. 63–71. DOI: [10.1515/rams-2018-0048](https://doi.org/10.1515/rams-2018-0048).
17. Vakaeva A.B., Grekov M.A. Stress-strain state of an elastic body with a nearly circular hole incorporating surface stress. *Protsessy upravleniya i ustoychivost*, 2015, vol. 2, no. 1, pp. 125–130.
18. Åman M., Berntsson K., Marquis G. An efficient stress intensity factor evaluation method for interacting arbitrary shaped 3D cracks. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, vol. 109, article number 102767. DOI: [10.1016/j.tafmec.2020.102767](https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2020.102767).

19. Okulova D.D., Sedova O.S., Pronina Y.G. The Effect of Surface Defects Interaction on the Strength of a Pressurised Spherical Shell. *Procedia Structural Integrity*, 2021, vol. 33, no. C, pp. 1055–1064. DOI: [10.1016/j.prostr.2021.10.117](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.117).
20. Ben Ahmed A., Houria M.I., Fathallah R., Sidhom H. The effect of interacting defects on the HCF behavior of Al-Si-Mg aluminum alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, vol. 779, pp. 618–629. DOI: [10.1016/j.jallcom.2018.11.282](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.282).
21. Yamashita Y., Murakami T., Mihara R., Okada M., Murakami Y. Defect analysis and fatigue design basis for Ni-based Superalloy 718 manufactured by selective laser melting. *International Journal of Fatigue*, 2018, vol. 117, pp. 485–495. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2018.08.002](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.08.002).
22. Beretta S., Romano S. A comparison of fatigue strength sensitivity to defects for materials manufactured by AM or traditional processes. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 94, pp. 178–191. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2016.06.020](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.06.020).
23. Le V.D., Saintier N., Morel F., Bellett D., Osmond P. Investigation of the effect of porosity on the high cycle fatigue behaviour of cast Al-Si alloy by X-ray microtomography. *International Journal of Fatigue*, 2018, vol. 106, pp. 24–37. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2017.09.012](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.09.012).
24. Ben Ahmed A., Nasr A., Bahloul A., Fathallah R. The impact of defect morphology, defect size, and SDAS on the HCF response of A356-T6 alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 92, no. 1, pp. 1113–1125. DOI: [10.1007/s00170-017-0192-6](https://doi.org/10.1007/s00170-017-0192-6).
25. Serrano-Munoz I., Buffiere J.Y., Mokso R., Verdu C., Nadot Y. Location, location & size: defects close to surfaces dominate fatigue crack initiation. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, article number 45239. DOI: [10.1038/srep45239](https://doi.org/10.1038/srep45239).
26. Luetje M., Wicke M., Bacaicoa I., Brueckner-Foit A., Geisert A., Fehlbier M. 3D characterization of fatigue damage mechanisms in a cast aluminum alloy using X-ray tomography. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 103, pp. 363–370. DOI: [10.1016/j.ijfatigue.2017.06.020](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.06.020).

## Simulation of the surface defects influence on the aluminum alloy behaviour under the cyclic load conditions

© 2022

Liana A. Almazova\*<sup>1</sup>, student

Olga S. Sedova<sup>2</sup>, PhD (Physics and Mathematics),

assistant professor of Chair of Computer Techniques of Solids Mechanics

Saint Petersburg State University, Saint Petersburg (Russia)

\*E-mail: [st080595@student.spbu.ru](mailto:st080595@student.spbu.ru)

<sup>1</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8695-3598>

<sup>2</sup>ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9097-8501>

Received 04.08.2021

Accepted 15.03.2022

**Abstract:** Aluminum and its alloys, such as the Al–Si–Mg alloy, are widely used in various industrial and engineering fields due to their mechanical properties. In this case, the defects occurring during the casting process adversely affect the behavior of this alloy under cyclic load conditions. Therefore, the study aimed to investigate the surface defect influence on the material's fatigue strength is currently of great importance. The paper presents a numerical investigation based on the finite element method intended to evaluate the effect of the interaction of the complex-shaped defects on the stress of the Al–Si–Mg aluminum alloy. The developed complex-defect model consists of a hemispherical main (base) defect and a secondary defect at the bottom of the main one. The authors use the Chaboche model to describe the material's behavior under the cyclic load conditions. The paper contains the computational solution constructed with the ANSYS Workbench platform. The authors supposed that it is possible to approximate the considered complex defect form by an equivalent simplified defect. The study shows that the maximum von Mises stress values for the complex-shaped defects are achieved at the joint of the secondary defect with the main one. In the case of an equivalent defect, the maximum values are observed at the defect's bottom and on the periphery. The authors comparatively estimated the uncertainty obtained using an equivalent defect and the cases of three complex-shaped defects and three hemispherical defects without additional (secondary) damage. This estimation shows that in the case of a complex-shaped defect, the equivalent defect model has an error of 14.5 %, which is 6.5 % greater than in the case of the hemispherical defects without secondary damages at the bottom.

**Keywords:** aluminum alloy; stress-strain state; surface defect; pitting corrosion; localized corrosion; interacting defects; cyclic loads; Chaboche model; von Mises stress.

**Acknowledgments:** The study was carried out using the computational resources of the Resource Center “Computer Center of SPbU”.

The paper was written on the reports of the participants of the X International School of Physical Materials Science (SPM-2021), Togliatti, September 13–17, 2021.

**For citation:** Almazova L.A., Sedova O.S. Simulation of the surface defects influence on the aluminum alloy behaviour under the cyclic load conditions. *Frontier Materials and Technologies*, 2022, no. 1, pp. 7–14. DOI: [10.18323/2782-4039-2022-1-7-14](https://doi.org/10.18323/2782-4039-2022-1-7-14).