

УДК 539.3-620.1

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ТИПОВ ОТВЕРСТИЕ И ВМЯТИНА НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКТИВНО-ПОДОБНЫХ ОБРАЗЦОВ

©2023 г. Д.В. Гриневич^{1*}, О.В. Митрофанов^{2*}, Н.О. Яковлев^{1*}, И.В. Гулина^{1*},
Л.А. Князев^{2*}, А.Д. Монахов^{1*}

^{1*} ФГУП НИЦ «Курчатовский институт» — Всероссийский научно-исследовательский
институт авиационных материалов, Москва
E-mail: d.v.grinevich@gmail.com

^{2*} Филиал ПАО «Корпорация «Иркут» — «Региональные самолеты», Москва

Поступила в редакцию 23 марта 2022 г.

После доработки 31 августа 2022 г. принята к публикации 4 октября 2022 г.

Приведены результаты исследования взаимного влияния концентраторов напряжения типов вмятина (выполнена полусферическим индентором диаметром 25 мм на глубину, равную толщине листа) и отверстие диаметром 4 мм в тонких обшивках толщиной 1,5 и 3,0 мм на статическую прочность и усталость конструктивно-подобных образцов из алюминиевого сплава 1163АТ. Наличие вмятины не привело к снижению статической прочности, в то время как при комбинации концентраторов напряжения вмятина + отверстие прочность снижается на величину до ~8% независимо от расположения отверстия во вмятине. Положение отверстия относительно центра вмятины практически не сказывается на наклоне кривой усталости, тогда как смещение отверстия от центра к краю вмятины приводит к снижению долговечности.

Ключевые слова: прочность; усталость; повреждение; вмятина; вмятина + отверстие; алюминиевый сплав.

В течение срока службы летательного аппарата (ЛА) в обшивке фюзеляжа, крыла, оперения могут возникать разного рода повреждения от ударов летящих птиц, камней, поднятых воздушной струей с поверхности взлетно-посадочных полос, инструмента. Кроме того, возможны повреждения в результате столкновения с наземной техникой, например при неаккуратном ее обслуживании. Такие связанные с энергией удара повреждения при рассмотрении объединяются в общую группу — повреждения посторонними предметами (ППП — Foreign Object Damage, FOD), так как вызывают один из распространенных типов повреждений и являются одной из основных причин усталостного разрушения или снижения прочности панелей обшивки фюзеляжа, изготовленных из алюминиевых сплавов [1—6].

Тема высокой степени PPP изучена достаточно полно, так как повреждения, связанные с большой энергией удара, представля-

ют повышенную опасность для ЛА. На панелях обшивки, подвергшейся подобным ударам (например, птицами), образуются значительные повреждения — отверстия, трещины и/или вмятины [7—10].

При низкой энергии удара повреждения не катастрофичны, в основном имеют вид вмятин без существенного изменения конфигурации конструкции, однако могут повлиять на статические и усталостные характеристики обшивки и, как следствие, на эксплуатацию ЛА. Влияние концентраторов напряжения подобного типа изучено в меньшей степени, чем PPP с большой энергией удара. Можно отметить работу [11], в которой на образцах обшивки толщиной 1,0 и 1,5 мм из сплава 2024Т3 исследуется влияние вмятин разной глубины на статические и усталостные свойства сплава. Даже множественные вмятины не оказывают существенного влияния на статические свойства (сжа-

тие, сдвиг) и несколько повышают несущую способность. Однако в статье [11] не делается четких выводов о влиянии вмятин на усталостные свойства. Опасным местом зарождения усталостных трещин являются края вмятины, где велики изгибные напряжения. В работах [12, 13] рассматривается влияние концентраторов напряжений в виде вмятин разной формы (сферическая, коническая и U-образная) на остаточную прочность и усталостные характеристики образцов толщиной 2 мм из сплава 2024Т3. В этих работах показано, что при статическом нагружении сжатием вмятина может увеличить жесткость пластины (ослабление наблюдалось только в случае неровных краев концентратора), а появление сопутствующего изгиба пластины вне вмятины уменьшает несущую способность образца. Изгиб пластины вне вмятины до 2,5 мм не оказывает влияния на усталостную долговечность, а сферическая вмятина снижает усталостную долговечность образцов по квадратичному закону по мере увеличения ее глубины. В работе [14] при исследовании влияния концентратора напряжения в виде вмятины на образцы из алюминиевого сплава 2198Т851 со сварным швом отмечено снижение усталостных свойств. Указывается, что для вмятины местом зарождения трещины служит точка рядом с ее краем в месте перегиба.

Учитывая практическую важность прочностных и усталостных свойств материала обшивки ЛА и зависимость этих свойств от

ППП в представленной работе исследовали взаимное влияние на статическую прочность и долговечность концентраторов напряжения двух типов: отверстия диаметром 4 мм и вмятины в виде сферического сегмента диаметром 25 мм в тонких обшивках толщиной 1,5 и 3,0 мм из алюминиевого сплава 1163АТ.

Материалы и экспериментальные методы. Конструктивно-подобные образцы (КПО) для исследований изготавливались из листов алюминиевого сплава 1163АТ толщиной 1,5 и 3,0 мм (в поперечном направлении). В табл. 1 приведены восемь вариантов КПО для изучения взаимного влияния концентраторов напряжения, а на фиг. 1 изображена схема КПО с тремя положениями на вмятине концентратора напряжения типа отверстие (№1—№3) и приведена фотография испытанного КПО с отверстием в положении №1 и усталостной трещиной.

Вмятину на КПО получали вдавливанием стального бойка диаметром 25 мм до глубины, равной толщине обшивки. На фиг. 2 приведены отсканированные с помощью лазерного микроскопа LEXT OLS 4100 (OLYMPUS, Япония) трехмерные поверхности образцов с нанесенной вмятиной на КПО толщиной 1,5 и 3,0 мм (см. в табл. 1 варианты 1 и 5).

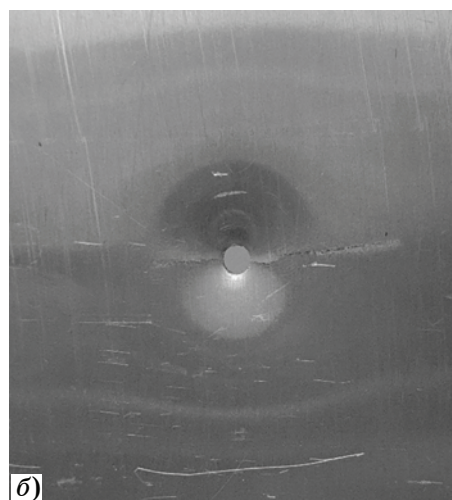
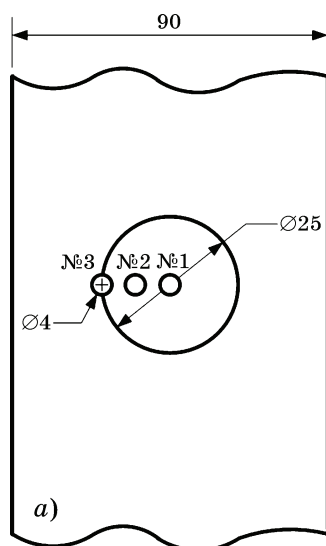
Для вариантов 2—4 и 6—8 (см. табл. 1) КПО, моделирующие взаимное влияние концентраторов в виде вмятины и отверстия, изготавливали следующим образом: сначала

Таблица 1

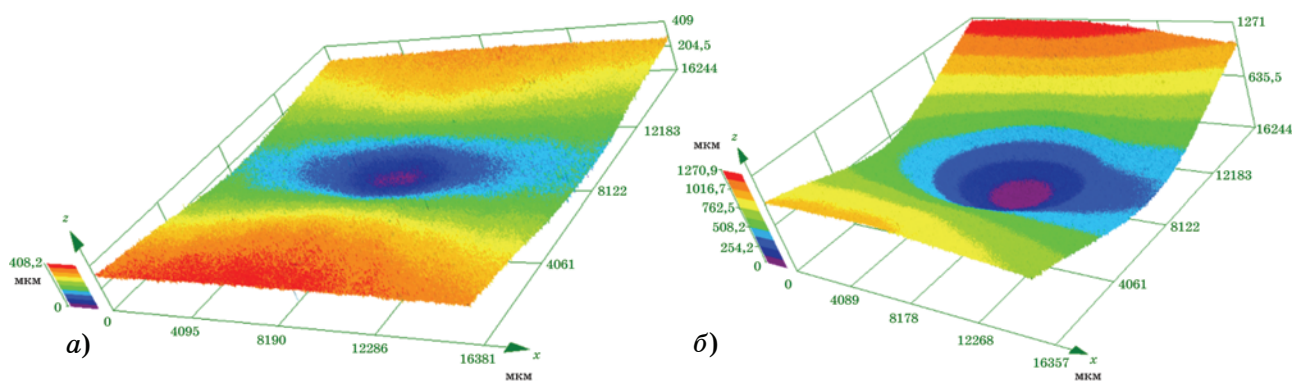
Описание вариантов КПО* из листов сплава 1163АТ
с концентраторами напряжения: вмятина (варианты 1 и 5)
и вмятина + отверстие (варианты 2—4 и 6—8)

h , мм	d , мм	КПО	Положение отверстия
1,5	1,5	1	Отсутствует
		2	В центре вмятины (отв. №1 на фиг. 1)
		3	На полурадиусе вмятины (отв. №2 на фиг. 1)
		4	На краю вмятины (отв. №3 на фиг. 1)
3,0	3,0	5	Отсутствует
		6	В центре вмятины (отв. №1 на фиг. 1)
		7	На полурадиусе вмятины (отв. №2 на фиг. 1)
		8	На краю вмятины (отв. №3 на фиг. 1)

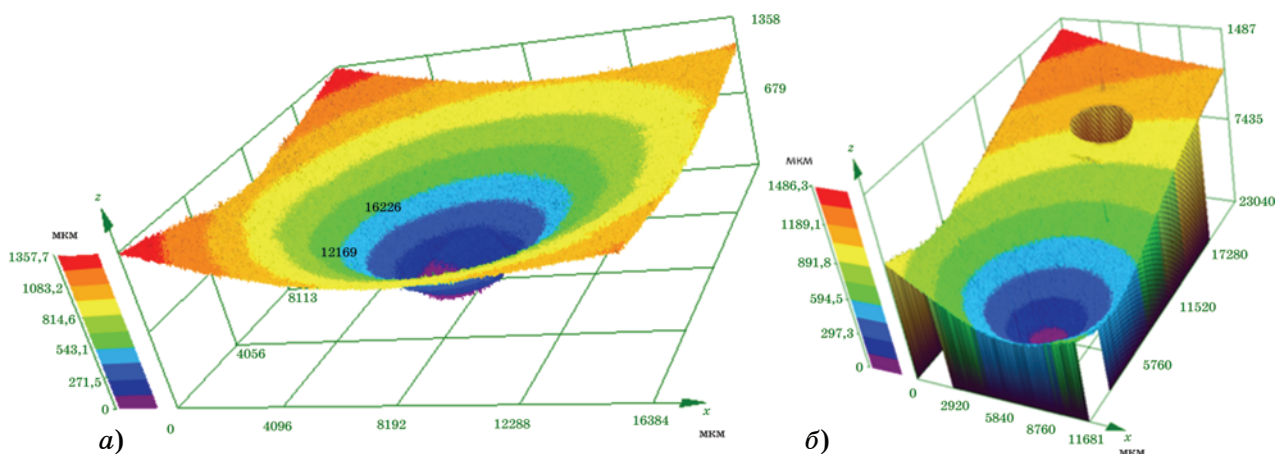
* h — толщина (равна толщине листа); δ — глубина вмятины.



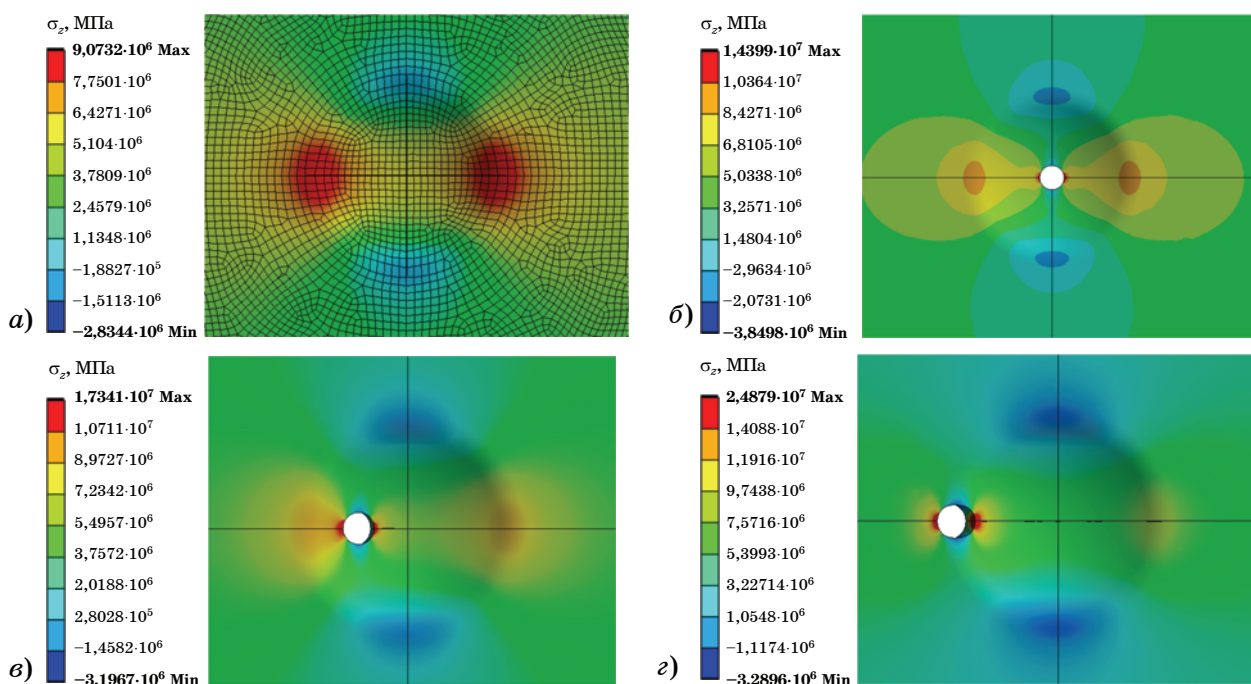
Фиг. 1. Общая схема КПО (а) с разными положениями (№1—№3) концентратора напряжения типа отверстие и фотография образца (б) с отверстием в положении №1



Фиг. 2. Полученные 3D-сканированием поверхности центральной части вмятины на КПО листов толщиной 1,5 (а) и 3,0 мм (б)



Фиг. 3. Полученные 3D-сканированием поверхности центральной части КПО толщиной 1,5 мм с концентраторами напряжения вмятина + отверстие: а — центры отверстия и вмятины совпадают; б — отверстие находится на краю вмятины



Фиг. 4. Расчетные нормальные напряжения σ_z (МПа) для КПО толщиной 3 мм с концентратором напряжения: вмятина (а), вмятина + отв. №1 (б), вмятина + отв. №2 (в), вмятина + отв. №3 (г)

сверлили отверстие диаметром 4 мм, а затем проводили вдавливание стальным бойком диаметром 25 мм для получения вмятины глубиной δ , равной толщине обшивки в зоне отверстия (фиг. 3).

Статические свойства КПО определяли с помощью растяжения до разрушения. Испытания проводились на КПО всех типов с определением разрушающего номинального напряжения $\sigma_{\text{в}}^{\text{к}}$. Для получения статической чувствительности материала к концентраторам напряжения проведено испытание на растяжение образцов без каких-либо концентраторов с определением максимального разрушающего напряжения $\sigma_{\text{в}}$.

Долговечность образцов определяли по числу циклов до разрушения при двух уровнях напряжений: 78 и 157 МПа; коэффициент асимметрии $R_{\sigma} = 0$ (нулевой цикл нагружения) и частота 5 Гц. Испытания проводили по схеме повторно-переменного растяжения в режиме мягкого нагружения по синусоидальному закону [15].

Моделирование. Положение отверстия в разных частях вмятины приводит соответственно к неодинаковому уровню концентрации напряжений в образце. Анализ концентрации напряжений проводили с применением численного моделирования. Для этого строили конечно-элементные модели КПО согласно исходным экспериментам. Модели-

ровался лист соответствующей толщины (1,5 и 3,0 мм) со следующими граничными условиями: нижняя кромка зафиксирована, к верхней приложена нагрузка в виде распределенной силы с ограничением перемещений по осям кроме вертикальной оси z . По величине максимального напряжения определяли коэффициент концентрации напряжения K_t при силе 1000 Н. На фиг. 4 приведены нормальные напряжения вдоль вертикальной оси z в районе концентраторов напряжения в листе толщиной 3 мм (возможные остаточные напряжения не учитывались).

Номинальное напряжение определяется без учета искажений геометрии по формуле:

$$\sigma_{\text{ном}} = F/h(H - d), \quad (1)$$

где F — приложенная сила; h , H — толщина и ширина КПО; d — диаметр отверстия (для случая концентратора напряжения только вмятиной $d = 0$).

Для КПО из листов толщиной 1,5 мм в случае концентрации напряжения вмятиной номинальное напряжение $\sigma_{\text{ном}} = 3,70$ МПа, а при комбинированном случае вмятина + отверстие $\sigma_{\text{ном}} = 3,88$ МПа. Аналогичные данные для КПО из листов толщиной 3,0 мм составляют 7,40 и 7,75 МПа.

Характеристикой концентраторов принят коэффициент концентрации напряжения, для

каждого расчетного случая равный отношению максимального расчетного напряжения $\sigma_{\max}$ к номинальному напряжению:

$$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{ном}} \quad (2)$$

Результаты эксперимента и их обсуждение. В табл. 2 представлены рассчитанные коэффициенты концентрации напряжения для рассмотренных вариантов, а также экспериментально определенная чувствительность материала к концентраторам напряжений, которая оценивается по отношению разрушающего номинального напряжения образца с концентратором ($\sigma_{\text{в}}^{\text{к}}$) к максимальному разрушающему напряжению для образцов без каких-либо концентраторов ($\sigma_{\text{в}}$).

Таблица 2

Результаты оценки статической чувствительности* сплава 1163АТ к концентраторам напряжения

h , мм	Вид концентраторов напряжения**	K_t	$\sigma_{\text{в}}^{\text{к}} / \sigma_{\text{в}}$
1,5	Вмятина диам. 25×1,5 мм	2,49	1,05
	Вмятина + отв. №1	3,57	0,93
	Вмятина + отв. №2	4,44	0,91
	Вмятина + отв. №3	6,23	0,92
3,0	Вмятина диам. 25×3,0 мм	2,45	1,11
	Вмятина + отв. №1	3,71	0,93
	Вмятина + отв. №2	4,47	0,92
	Вмятина + отв. №3	6,42	0,92

*Лист толщиной $h = 1,5$ и $3,0$ мм алюминиевого сплава 1163АТ.

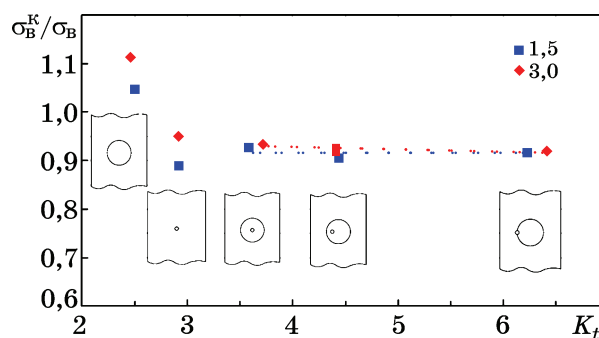
**Комбинированное влияние концентраторов напряжения: вмятины диаметром 25 мм и глубиной 1,5 и 3,0 мм и отверстия в трех положениях относительно центра вмятины.

Разрушающее номинальное напряжение образца с концентратором рассчитывается по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{в}}^{\text{к}} = F_{\max} / h(H - d), \quad (3)$$

где $F_{\max}$ — максимальная сила, при которой происходило разрушение образца.

В табл. 2 приведена полученная экспериментально статическая чувствительность сплава 1163АТ к концентраторам напряжений для рассмотренных КПО. Ее зависимость от коэффициента концентрации напряжения графически показана на фиг. 5.



Фиг. 5. Зависимость статической чувствительности сплава 1163АТ от коэффициента концентрации напряжения

Наложение вмятины приводит к повышению концентрации напряжений в 1,2—1,3 раза для положения отверстия в ее центре (см. №1 на фиг. 1) и в 1,5 раза для положения №2. Наиболее критично положение отверстия на краю вмятины, где на искажение ее геометрии (см. фиг. 4, а) накладывается концентрация напряжения у отверстия (фиг. 4, з). В итоге K_t может возрастать в 2,1—2,2 раза по сравнению с напряжением от простого отверстия. Однако при этом коэффициент чувствительности материала к концентратору напряжения нелинейно зависит от коэффициента концентрации напряжения (наименьшие результаты по прочности получены для положения отверстия №2 на вмятине). Для сплава 1163АТ наблюдается статическая нечувствительность к концентратору напряжения типа вмятина (и даже заметно повышение несущей способности КПО). Влияние оказывает наведенное остаточное напряжение на краях вмятины, вносящее упрочнение в конструкцию.

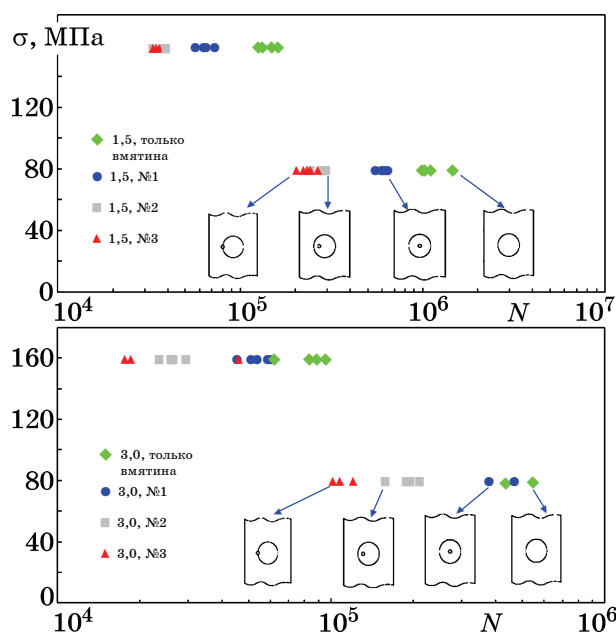
Кроме того, стоит отметить нечувствительность алюминиево-бериллиевых сплавов к концентраторам до определенных значений K_t . Например, в работах [16, 17] приведены следующие данные для сплава АБМ1 (поперечное направление вырезки образцов). Коэффициент чувствительности составляет: 1,01 для $K_t = 2,44$; 0,994 для $K_t = 2,5$ и 1,0 для $K_t = 2,57$. В то же время для сплава Д16 получено снижение статической прочности, наблюдается обратный эффект: для $K_t = 2,44$ коэффициент чувствительности составляет 0,949, для $K_t = 2,5$ — 0,931 и для $K_t = 2,57$ — 0,922 (поперечное направление вырезки образцов).

Наличие двух концентраторов напряжения отверстие + вмятина, как видно из ре-

Таблица 3

Данные для построения кривой усталости КПО
из листов сплава 1163АТ
с концентраторами разного вида

h , мм	Вид концентратора	K_t	Кривая усталости $N\sigma^m = 10^C$	
			m	C
1,5	Вмятина	2,49	2,98	11,69
	Вмятина + отв. №1	3,57	3,26	11,95
	Вмятина + отв. №2	4,44	2,90	10,92
	Вмятина + отв. №3	6,23	2,76	10,59
3,0	Вмятина	2,45	2,61	10,61
	Вмятина + отв. №1	3,71	2,93	11,16
	Вмятина + отв. №2	4,47	2,83	10,64
	Вмятина + отв. №3	6,42	2,32	9,44



Фиг. 6. Результаты испытаний на долговечность КПО из листов сплава толщиной 1,5 (а) и 3,0 мм (б) при разном положении концентраторов напряжения

зультатов, не оказывает взаимного влияния на чувствительность в зависимости от положения, что может быть связано опять же с наведенным упрочнением (остаточные напряжения по краям вмятины). Другими словами, искажение геометрии отверстия и повышение концентрации блокируются ростом остаточных напряжений к краю вмятины.

Результаты испытаний на долговечность образцов КПО с вмятиной и отверстием при разном его расположении представлены на фиг. 6.

В табл. 3 приведены результаты по усталостной долговечности. Как видно, повышение концентрации напряжений приводит к значительному снижению долговечности. Наиболее опасным является положение отверстия на краю вмятины (см. отв. №3 на фиг. 1).

Положение отверстия на краю вмятины приводит к максимальному падению усталостной долговечности КПО. Число циклов до разрушения для КПО толщиной 1,5 и 3 мм при $\sigma = 78$ МПа в зависимости от положения отверстия снижается соответственно в 2,6 и 3,7 раза при смещении отверстия на край вмятины (положение отв. №3). При $\sigma = 157$ МПа число циклов до разрушения для КПО толщиной 1,5 и 3,0 мм снижается соответственно в 1,8 и 2,3 раза при смещении отверстия из центра вмятины на ее край.

Выводы. 1. Проведено численно-экспериментальное исследование комбинированного влияния концентраторов напряжения вмятина + отверстие на механические свойства конструктивно-подобных образцов. Экспериментально определены статическая прочность и долговечность конструктивно-подобных образцов с концентраторами напряжения разного вида.

2. Получено, что для сплава 1163АТ наличие вмятины не привело к снижению статической прочности, в то время как при комбинировании концентраторов напряжения вмятина + отверстие отмечено снижение прочности на величину до 8% независимо от расположения отверстия во вмятине.

3. Положение отверстия относительно центра вмятины практически не сказывается на наклоне кривой усталости, в то время как смещение отверстия от центра к краю вмятины приводит к снижению долговечности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chauhan, T. A review on foreign object debris/damage (FOD) and its effects on aviation industry / T. Chauhan, Ch. Goyal, D. Kumari, A.K. Thakur // Mater. Today : Proc. 2020. V.33. №7. P.4336—4339. DOI : 10.1016/j.matpr.2020.07.457.
2. Каблов, Е.Н. Опыт и перспективы применения алюминий-литиевых сплавов в изделиях авиационной и космической техники / Е.Н. Каблов, В.В. Антипов, Ю.С. Оглодкова, М.С. Оглодков // Металлург. 2021. №1. С.62—70.
3. Левчук, В.В. Коррозионно-стойкие литейные алюминиевые сплавы (обзор) / В.В. Левчук, А.В. Трапезников, С.И. Пентюхин // Тр. ВИАМ : электрон.

- науч.-технич. журн. 2018. №7. Ст.04. URL : <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 10.01.2022). DOI : 10.18577/2307-6046-2018-0-7-33-40.
4. *Каблов, Е.Н.* Перспективные алюминиевые сплавы для паяных конструкций авиационной техники / Е.Н. Каблов, Н.В. Дынин, И. Бенариев, Н.Д. Щетинина, С.В. Самохвалов, С.В. Неруш // Заготовит. пр-ва в машиностроении. 2021. Т.19. №4. С.179—192.
 5. *Kablov, E.N.* New generation materials and technologies for their digital processing / E.N. Kablov // Herald Russ. Acad. Sci. 2020. V.90. №2. P.225—228.
 6. *Антипов, В.В.* Современные алюминиевые и алюминий-литиевые сплавы / В.В. Антипов, Ю.Ю. Ключкова, В.А. Романенко // Авиаци. матер. и технол. 2017. №S. С.195—211. DOI : 10.18577/2071-9140-2017-0-S-195-211.
 7. *Яковлев, Н.О.* К вопросу о долговечности шарнирно-болтовых соединений / Н.О. Яковлев, А.А. Селиванов, И.В. Гулина, А.В. Гриневич // Авиаци. матер. и технол. 2020. №4. С.79—85. DOI : 10.18577/2071-9140-2020-0-4-79-85.
 8. *McCarthy, M.A.* Modeling of bird strike on an aircraft wing leading edge made from fibre metal laminates Pt.2 : Modeling of strike with SPH bird model / M.A. McCarthy, J.R. Xiao, C.T. McCarthy, A. Damoulakos, J. Ramos, J.P. Gallard, V. Melito // Appl. Comp. Mater. 2004. №11(5). P.317—340.
 9. *Liu, J.* An experimental and numerical study of bird strike on a 2024 aluminum double plate / J. Liu, Z. Liu, N. Hou // Acta Mechan. Sol. Sin. 2019. №32. P.40—49. DOI : 10.1007/s10338-018-0071-1.
 10. *Hanssen, A.G.* A numerical model for bird strike of aluminium foam-based sandwich panels / A.G. Hanssen, Y. Girard, L. Olovsson, T. Berstad, M. Langseth // Intern. J. Impact Eng. 2006. V.32(7). P.1127—1144. DOI : 10.1016/j.ijimpeng.2004.09.004.
 11. *Guijt, C.* The effect of dents in fuselage structures on fatigue and static stability / C. Guijt, D. Hill, J. Rausch, S. Fawaz // Proc. of the 23rd ICAF sympos. of the intern. Committee on Aeronautical Fatigue, 08—10 June 2005. — Hamburg : [s.l.], 2005. P.1—13. URL:https://www.researchgate.net/profile/Scott-Fawaz/publication/266892982_THE_EFFECT_OF_DENTS_IN_FUSELAGE_STRUCTURES_ON_FATIGUE_AND_STATIC_STABILITY/links/59484efa0f7e9b1d9b23312e/THE-EFFECT-OF-DENTS-IN-FUSELAGE-STRUCTURES-ON-FATIGUE-AND-STATIC-STABILITY.pdf (дата обращения 10.01.2022 г.).
 12. *Li, Z.* Influence of dent on residual ultimate strength of 2024-T3 aluminum alloy plate under axial compression / Z. Li, M. Zhang, F. Liu, C. Ma, J. Zhang, Z. Hu, Y. Zhao // Trans. Nonfer. Metals Soc. China. 2014. V.24(10). P.3084—3094. DOI : 10.1016/s1003-6326(14)63446-4.
 13. *Li, Z.* Experimental study on the effect of dents induced by impact on the fatigue life of 2024-T3 aluminum alloy plate / Z. Li, R. Feng, Y. Wang, L. Wang // Eng. Struct. 2017. №137. P.236—244. DOI : 10.1016/j.engstruct.2017.01.048.
 14. *Xiang, Zh.* Influence of impact dents on the fatigue strength of aluminium alloy friction stir welds / Zh. Xiang, B. Chan, L. Santosh, V. Satikumar, S. Shi, R. Bao // Proc. Eng. 2010. V.2. P.1691—1700. DOI : 10.1016/j.proeng.2010.03.182.
 15. *Ерасов, В.С.* Испытания на усталость металлических материалов (обзор). Ч.1. Основные определения, параметры нагружения, представление результатов испытаний / В.С. Ерасов, Е.И. Орешко // Авиаци. матер. и технол. 2020. №4. С.59—70. DOI : 10.18577/2071-9140-2020-0-4-59-70.
 16. *Фридляндер, И.Н.* Создание, исследование и применение алюминиевых сплавов. Избр. тр. / И.Н. Фридляндер. — М. : Наука, 2013. 291 с.
 17. *Фридляндер, И.Н.* Бериллий — материал современной техники : справ. изд. / И.Н. Фридляндер, К.П. Яценко, Т.Е. Терентьева, Н.А. Хелковский-Сергеев. — М. : Металлургия, 1992. 128 с.