

Остаточные напряжения при упрочнении отверстия методами местного глубокого пластического деформирования

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Выполнен анализ остаточных напряжений, возникающих в результате упрочнения отверстия методами местного глубокого пластического деформирования. Расчеты проведены для двух алюминиевых сплавов Д16аТ и В95пчТ2. Получены зависимости остаточных напряжений от натяга при дорновании и глубины внедрения при барьерном обжати. Установлено влияние толщины элемента конструкции на эффективность упрочнения отверстия барьерным обжатием.

Ключевые слова: методы упрочнения, остаточные напряжения, метод конечных элементов, дорнование, барьерное обжатие.

С целью уменьшения невырабатываемого и несливаемого топлива в ребрах нижних панелей крыльев современных самолетов выполняют отверстия для перетекания топлива. Эксплуатация и наземные испытания самолётов показывают, что такие отверстия являются очагами возникновения усталостных трещин и могут привести к преждевременному разрушению конструкции крыла.

Многолетние исследования в направлении повышения ресурса привели к разработке и внедрению различных конструктивно-технологических методов упрочнения отверстий. Наиболее эффективными являются методы упрочнения отверстия местным глубоким пластическим деформированием (МГПД). К ним относятся дорнование, барьерное обжатие, раскатка и т. д.

Упрочнение отверстий методами МГПД заключается в создании отрицательных остаточных напряжений в концентраторе, наличие которых приводит к увеличению долговечности элемента конструкции.

В ряде источников [1–4] приведены экспериментальные исследования влияния методов упрочнения МГПД на долговечность элементов конструкций. Так, например, в работе [1] выполнен анализ выносливости образцов из алюминиевого сплава Д16Т, имитирующих участок стрингера с отверстием, упрочненным различными конструктивно-технологическими методами. Показано, что применение барьерного обжата позволяет повысить выносливость элемента конструкции с отверстием более чем в 5 раз.

В работе [2] представлены результаты испытаний образцов с отверстием из сплава В95Т, упрочненных дорнованием с натягом 3–3,5%. Отмечено, что данный способ упрочнения позволяет увеличить долговечность в 3–5 раз.

Авторами работ [3–4] выполнено комплексное исследование влияния различных методов упрочнения отверстия в образцах из алюминиевых сплавов Д16Т и В95Т на долговечность. Показано, что упрочнение отверстия методами МГПД повышает усталостную долговечность образцов более чем в 10 раз.

Несмотря на большое количество экспериментальных данных, на текущий момент в авиационной отрасли нет четких рекомендаций по выбору метода и параметров упрочнения в зависимости от материала, геометрических размеров элемента конструкции и условий его нагружения. Кроме этого, не установлено влияние параметров упрочнения на величину остаточных напряжений в отверстии.

В данной работе выполнено исследование остаточных напряжений, возникающих в результате упрочнения отверстия методами МГПД. Анализ проведен с использованием метода конечных элементов. Расчеты выполнены для двух алюминиевых сплавов Д16аТ и В95пчТ2.

Дорнование отверстий. Упрочнение методом дорнования заключается в протягивании инструмента (дорна) через отверстие. Диаметр дорна превышает диаметр отверстия. При этом происходит пластическое деформирование поверхности отверстия. Непосредственно вблизи отверстия возникают большие сжимающие напряжения, которые повышают долговечность упрочненного элемента конструкции.

В качестве объекта упрочнения выбрана полоса с центральным отверстием диаметром 8 мм, имитирующая рабочую часть экспериментального образца. Толщина полосы с отверстием – 4 мм. Геометрические параметры дорна приняты согласно рекомендациям, приведенным в литературе [7].

Свойства материала полосы с отверстием заданы в виде монотонной диаграммы деформирования (рис. 1), полученной по результатам испытаний на растяжение гладких образцов.

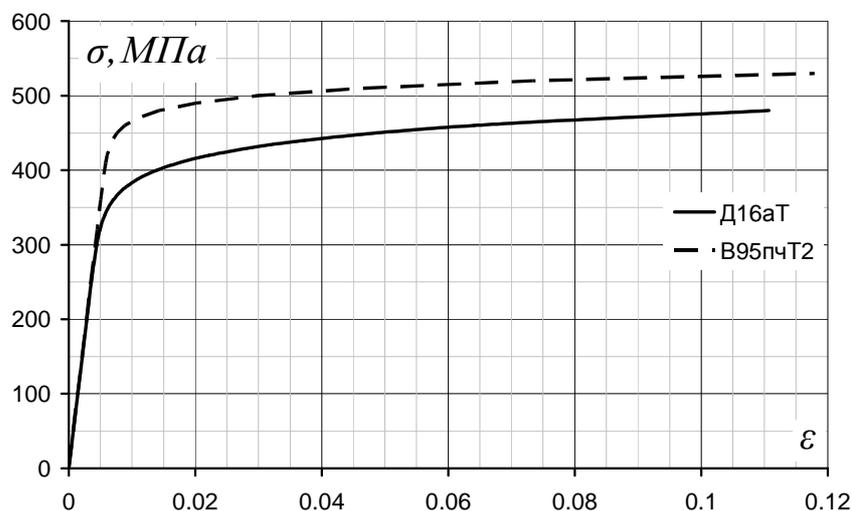


Рис. 1. Диаграммы деформирования алюминиевых сплавов Д16аТ и В95пчТ2

При моделировании процесса дорнования в конечно-элементном пакете рассмотрена четвертая часть модели с учетом условий симметрии по соответствующим поверхностям.

Конечно-элементная модель создана с помощью двадцатиузловых элементов типа Solid (рис. 2). Размер конечных элементов в зоне отверстий подобран таким образом, что двукратное увеличение количества элементов приводит к изменению напряжений не более чем на 3 %.

Контактная задача взаимодействия дорна с поверхностью отверстия решена с учетом трения. Коэффициент трения для пары «алюминий - сталь» со смазкой принят равным 0,08 [5].

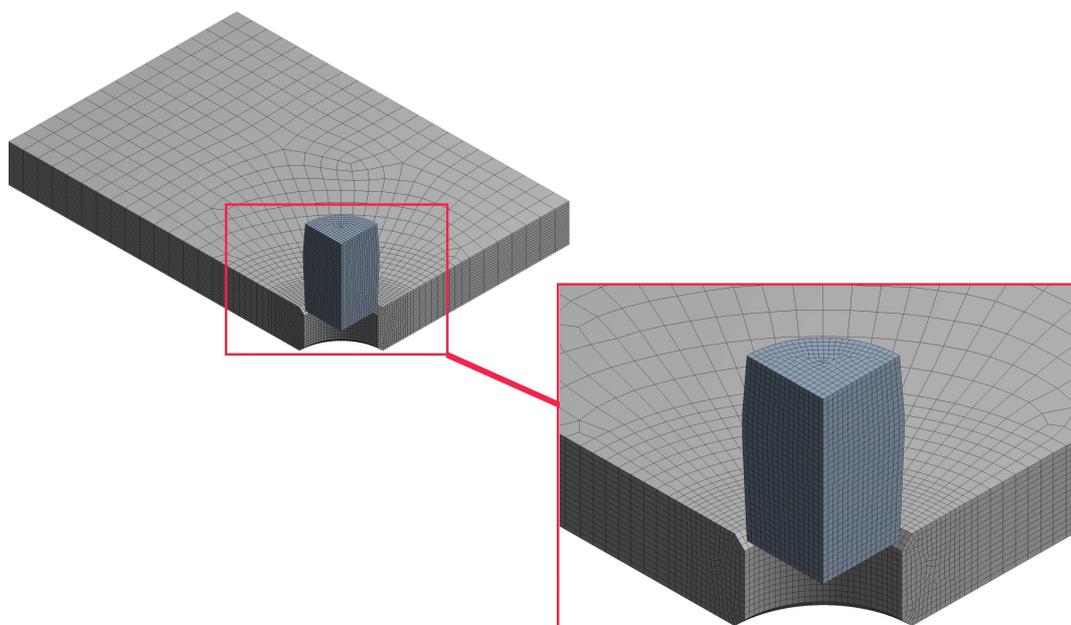


Рис. 2. Конечно-элементная сетка модели

После дорнования в зоне отверстия реализуется сложное напряженное состояние. На рис. 3 приведено распределение напряжений по Мизесу в полосе с отверстием из алюминиевого сплава Д16аТ после дорнования с натягом 3 %

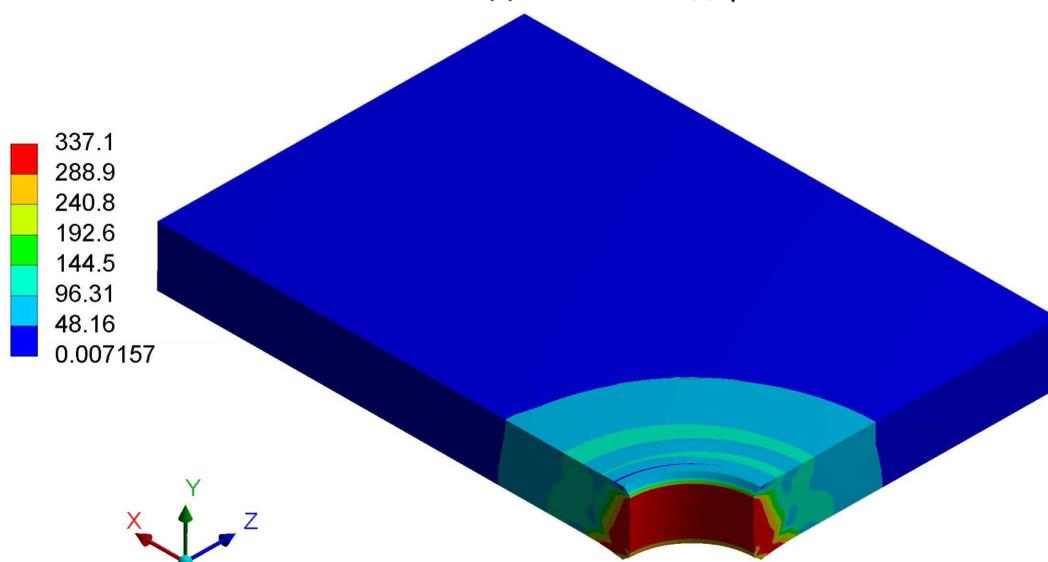


Рис. 3. Распределение напряжений по Мизесу в полосе с отверстием после дорнования с натягом 3% (сплав Д16аТ)

В качестве остаточных напряжений рассмотрены напряжения, вычисленные по формуле Мизеса с учетом знака наибольших по модулю главных напряжений [6]. На рис. 4 показано распределение остаточных напряжений от края отверстия в поперечном сечении полосы (по оси Z) после дорнования с натягом 3%.

Следует отметить, что в результате дорнования остаточные напряжения распределяются по высоте отверстия неравномерно. Причиной данной особенности является наличие "корсетности" отверстия и образования наплыва на свободном крае [5].

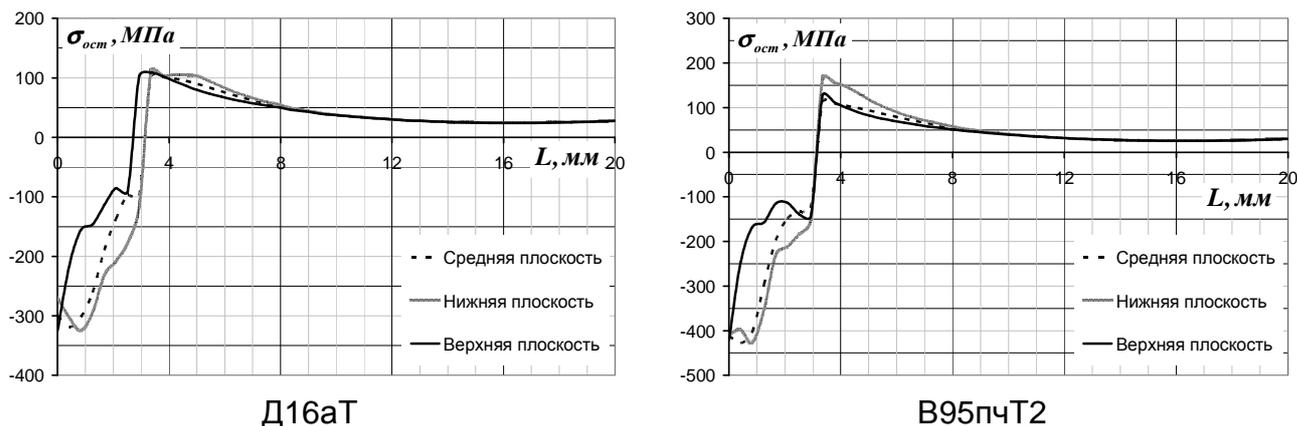


Рис. 4. Остаточные напряжения в поперечном сечении полосы с отверстием после дорнования с натягом 3%

Выполнен анализ влияния натяга при дорновании на величину остаточных напряжений в отверстии. Зависимость остаточных напряжений от натяга показана на рис. 5.

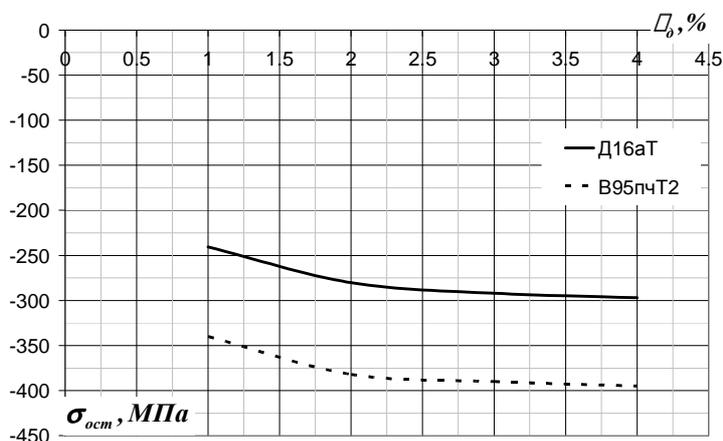


Рис. 5. Зависимость остаточных напряжений в концентраторе от величины натяга при дорновании

В результате расчетов установлено, что при дорновании с натягом более 2 % остаточные напряжения практически не изменяются. Следовательно, увеличение натяга более 2 % не приведет к значительному росту долговечности элемента конструкции. Качественно это согласуется с результатами экспериментальных исследований, приведенных в работе [3]. Долговечность образцов со свободными отверстиями и образцов болтовых соединений из алюминиевого сплава В95Т с применением дорнования отверстия с натягом в диапазоне 2–3,6 % лежит в одной совокупности по числу циклов до разрушения.

Барьерное обжатие отверстия. Упрочнение отверстий методом барьерного обжатия заключается в выштамповке лунок сегментной конфигурации вокруг отверстия. В результате возникают отрицательные остаточные напряжения, повышающие характеристики сопротивления усталости элемента конструкции.

Геометрические параметры рабочей части внедряемого инструмента выбраны из условия получения максимальных остаточных напряжений сжатия [7].

Вдавливание обжимок выполняют с двух сторон по толщине элемента конструкции. На рис. 6 показаны конечно-элементные модели полосы с отверстием в зоне внедрения инструмента и рабочей части обжимки.

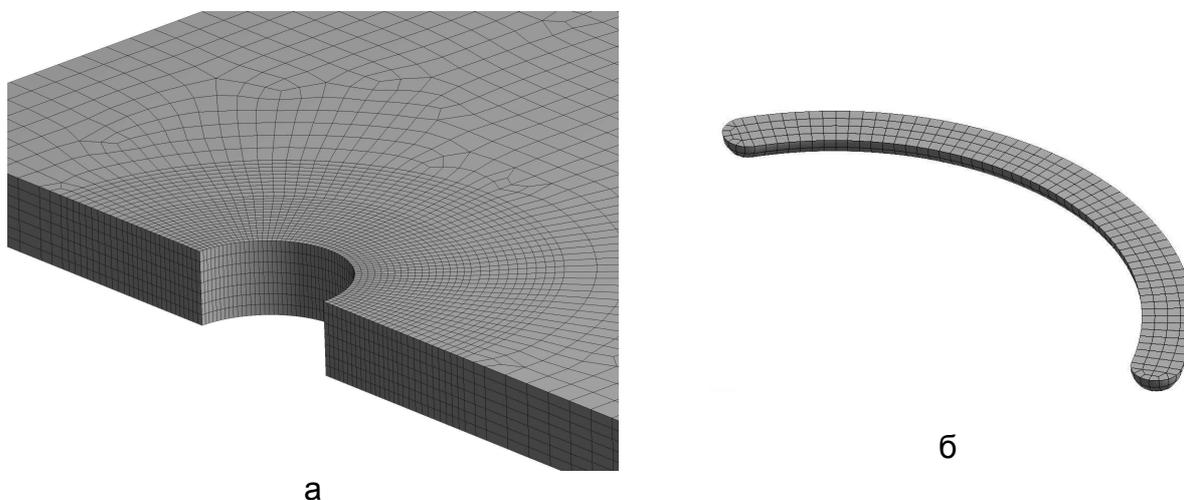


Рис. 6. Конечно-элементные модели:
а - участок полосы с отверстием в зоне внедрения инструмента; б - рабочая часть обжимки

Решение контактной задачи в физически нелинейной постановке выполнено с учетом трения между поверхностями полосы и обжимок. Коэффициент трения для пары «алюминий - сталь» принят равным 0,6 [5].

При внедрения обжимок в районе отверстия происходит пластическое деформирование материала и реализуется сложное напряженно-деформированное состояние. На рис. 7 показано распределение напряжений по Мизесу в полосе с отверстием из алюминиевого сплава Д16аТ после барьерного обжатия.

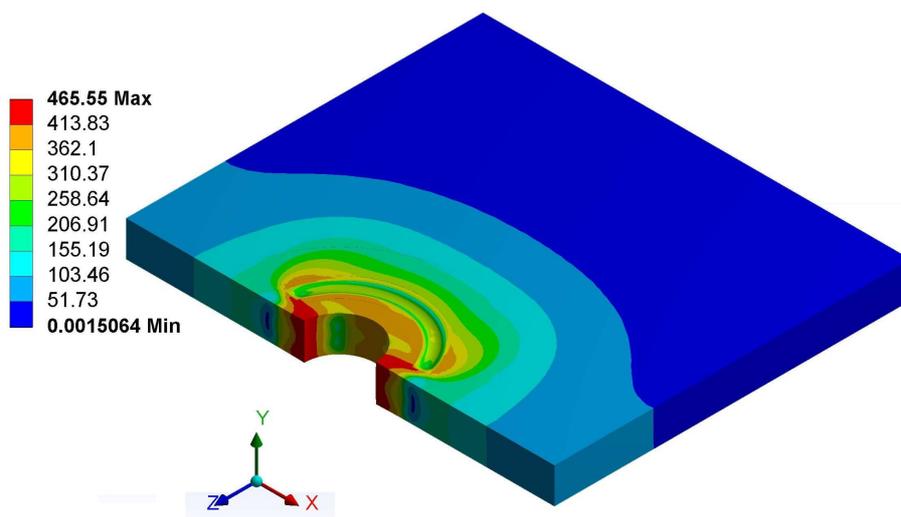


Рис. 7 - Распределение напряжений по Мизесу после обжатия полосы с отверстием (сплав Д16аТ, глубина обжатия – 0,3 мм)

На рис. 8 приведено распределение остаточных напряжений в поперечном сечении полосы с отверстием (по оси X) после применения барьерного обжатия.

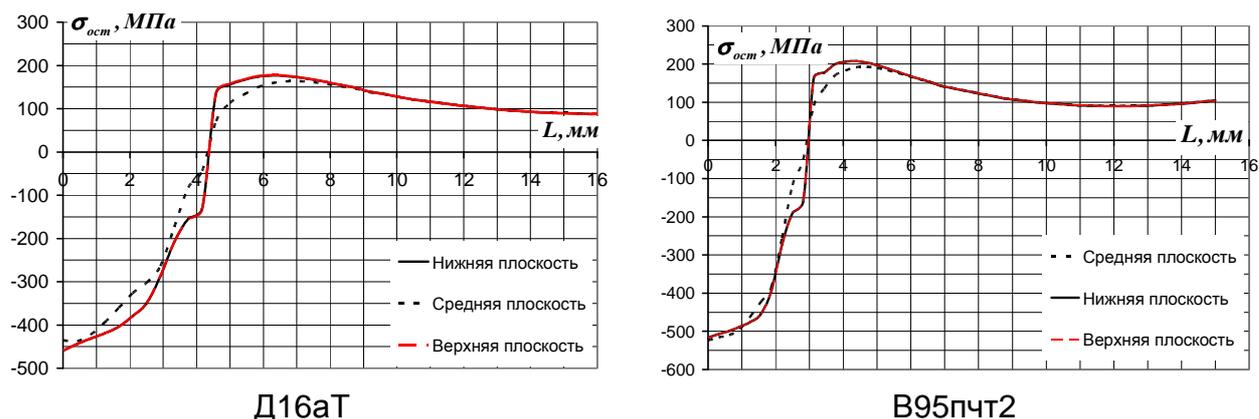


Рис. 8. Остаточные напряжения в поперечном сечении полосы с отверстием после барьерного обжатия (глубина внедрения обжимок – 0,3 мм)

Следует отметить, что в результате барьерного обжатия отверстия остаточные напряжения практически равномерно распределяются по высоте отверстия. Отрицательные остаточные напряжения залегают на глубину до 4 мм.

Проанализировано влияние глубины внедрения обжимки на величину остаточных напряжений в концентраторе. На рис. 9 приведена зависимость остаточных напряжений в концентраторе от глубины обжатия полосы с отверстием.

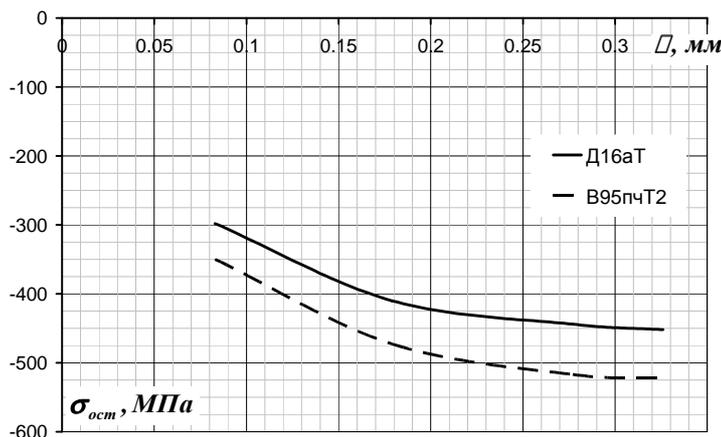


Рис. 9. Зависимость остаточных напряжений в концентраторе от глубины внедрения обжимок

Как видно из рис. 9, зависимость остаточных напряжений в концентраторе от глубины обжатия имеет нелинейный характер. Внедрение обжимок на глубину более 0,3 мм не целесообразно, так как остаточные напряжения изменяются в пределах 8 %, но при этом значительно растет усилие, требуемое для обжатия.

Выполнено исследование влияния толщины элемента конструкции с отверстием на величину остаточных напряжений при глубине вдавливания обжимок 0,3 мм. На рис. 10 показана зависимость остаточных напряжений от толщины элемента конструкции с отверстием.

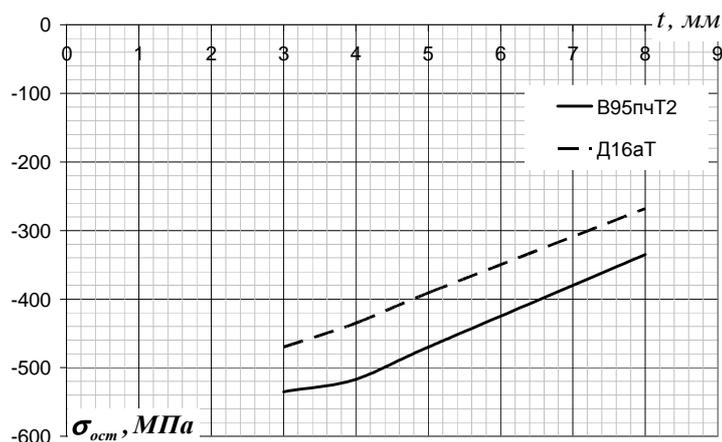


Рис. 10. Зависимость остаточных напряжений в концентраторе от глубины внедрения обжимок

Установлено, что величина остаточных напряжений существенно зависит от толщины элемента конструкции при фиксированных параметрах упрочнения. Следовательно, при выборе параметров упрочнения отверстий необходимо использовать индивидуальный подход в зависимости от геометрических параметров и материала элемента конструкции.

Выводы

Выполнен расчет остаточных напряжений в концентраторе, возникающих в результате упрочнения отверстия методами МГПД. Рассмотрены методы барьерного обжатия и дорнования отверстия. Расчеты выполнены для двух алюминиевых сплавов Д16аТ и В95пчТ2.

Проведен анализ влияния параметров упрочнения (натяг, глубина обжатия) на величину остаточных напряжений в концентраторе. Показано, что дорнование с натягом более 2 % и барьерное обжатие на глубину более 0,3 мм не приведут к существенному увеличению остаточных напряжений.

Установлено существенное влияние толщины упрочняемого элемента конструкции на величину остаточных напряжений в отверстии при фиксированных параметрах упрочнения отверстия барьерным обжатием.

Список литературы

1. Исследование выносливости нижних панелей крыла с отверстиями для перетекания топлива [Текст] / В. П. Рычик, А. Е. Литвиненко, Н. Т. Остапенко, Е. Т. Василевский // Тр. науч.-техн. конф. по выносливости и ресурсу авиационных конструкций (ноябрь 1976); под ред. А. З. Воробьева и Н. Г. Белого. - С. 100-103.
2. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов [Текст] / А. И. Пешкар, Ю. М. Тарасов, Г. А. Кривов и др. - М.: Аграф-пресс, 2006. - 304 с.
3. Пширков, В. Ф. Технология выполнения высокоресурсных соединений [Текст] / В. Ф. Пширков. - М.: Отраслевая библиотека "Технический прогресс и повышение квалификации", 1980. - 170 с.
4. Гуменный, А.М. Интегрированное проектирование высокоресурсных

растянутых панелей крыла транспортного самолета: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.03; защищена 2009 / Гуменный Андрей Михайлович. – Х., 2009. – 203 с.

5. Кривцов, В. Скоростное дорнование отверстий авиационных конструкций из алюминиевых сплавов пневмоимпульсными устройствами [Текст]: моногр. / В. Кривцов, Ю. Воробьев, В. Воронько. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2010. – 99 с.

6. Стрижиус, В. Е. Методы расчета на усталость элементов авиационных конструкций при многоосном нагружении [Текст] / В. Е. Стрижиус // Науч. вестн. МГТУ ГА. Аэромеханика, прочность, поддержание летной прочности ВС. - 2012. - №187. - С. 65–74.

7. Заруцкий, А. В. Анализ остаточных напряжений после упрочнения отверстия методом барьерного обжатия [Текст] / А. В. Заруцкий // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского "ХАИ" – Х., 2013. – С. 85 – 93.

Рецензент: канд. тех. наук Т. С. Бойко Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского, «ХАИ», Харьков
Поступила в редакцию 11.02.2014

Залишкові напруження при зміцненні отвору методами місцевого глибокого пластичного деформування

Виконано аналіз залишкових напружень, що виникають в результаті зміцнення отвору методами місцевого глибокого пластичного деформування. Розрахунки проведено для двох алюмінієвих сплавів D16AT і V95пчT2. Отримано залежності залишкових напружень від натягу при дорнуванні та глибини вдавлювання при бар'єрному обтисненні. Встановлено вплив товщини елемента конструкції на ефективність зміцнення отвору бар'єрним обтисненням.

Ключові слова: методи зміцнення, залишкові напруження, метод скінчених елементів, дорнування, бар'єрне обтиснення.

Residual stresses at hardening hole by methods of deep local plastic deformation

The analysis of residual stresses resulting from hardening hole by methods of deep local plastic deformation are made. Calculations are performed for two aluminum alloys and D16AT V95pchT2. The dependences of residual stresses from interference with mandrelling and the depth of penetration in the barrier reduction is received. The influence of the thickness of the structural element to strengthening the effectiveness of the hole barrier compression was determined.

Keywords: methods of hardening, residual stresses, finite element method, mandrelling, barrier compression.