

УДК 621.7

Тимошенко А.В., к.т.н. доц.; Пиманов В.В., к.т.н.; Бабак А.Н., Коробко Е.Н.
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДОРНОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВКАХ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16ЧТ

Timoshenko A., Pimanov V., Babak A., Korobko E.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (pimanov@ukr.net)

RESEARCH OF MANDRELLING PROCESS OF TECHNOLOGICAL HOLES IN THE AVIATION ALLOY D16CT

Рассмотрен способ обработки отверстий для ответственных деталей из алюминиевого сплава Д16ЧТ путем дорнования с разными величинами натяга. Представлены результаты расчетов методом конечных элементов в программном комплексе DEFORM. Расчётным путем установлено влияния величины натяга при дорновании на напряженно-деформированное состояние, распределение поврежденности в материале вокруг отверстия и конечные форму и размер отверстия после дорнования. Для проверки результатов численного моделирования были проведены экспериментальные исследования дорнования отверстий в заготовках из алюминиевого сплава Д16ЧТ с использованием для смазки смеси индустриального масла И40, гранита (мелкого помола) и дисульфид молибдена.

Ключевые слова: дорнование; технологическое отверстие; холодная деформация, натяжение, прочность; поврежденность, напряженно-деформированное состояние.

Введение

Получения отверстий в листовых заготовках путем пробивки или механической обработкой, приводит к снижению точности и качества такого отверстия, при этом на боковой поверхности присутствуют поверхностные дефекты. Данные дефекты служат концентраторами напряжений и приводят к снижению прочностных свойств детали, особенно изделий работающих в условиях циклической нагрузки. Такие дефекты могут быть исключены, путем повышения качества поверхности отверстий. Одним из методов повышения качества поверхностей и точности отверстий есть дорнование. Указанный метод основан на способности пластичных металлов приобретать под действием внутреннего давления остаточные деформации без разрушения металла заготовки. При этом процесс сопровождается изменением первоначальных размеров отверстий. Кроме того, такой метод снижает расход материала, количество операций и объем обработки резанием.

С помощью дорнования можно обрабатывать отверстия в различных изделиях, особенно в изделиях с повышенными требованиями к качеству поверхности и прочностных характеристик. Суть процесса состоит в следующем: через отверстие в заготовке протягивают дорн, который в процессе деформирования обеспечивает необходимый конечный размер отверстия, с заданными механическими свойствами материала, за счет пластической деформации. В работах [1, 2] авторами приводятся способы интенсивного упрочнения металла вокруг отверстий в листовых заготовках. Использование поверхностного упрочнения технологического отверстия с помощью пластической деформации позволяет повысить предел прочности материала в зоне отверстия. Что способствует повышению прочности, в целом, изделию.

Однако, на сегодняшний день, обработка отверстий дорнованием получила более широкое распространение в различных отраслях машиностроения, а особенно в отрасли авиастроения. Это обусловлено относительной простотой реализации процесса.

Анализ конструктивно-технологических методов повышения усталостной долговечности силовых элементов летательных аппаратов в зонах функциональных отверстий рассмотрены в работах [3, 4]. Эффективными с точки зрения повышения усталостной долговечности элементов конструкции с концентраторами напряжений в виде отверстий являются технологические методы, основанные на глубоком пластическом деформировании материала в зоне отверстия. Авторы [5 - 7] указывают, что обработка отверстий в листовых материалах методом дорнования с соответствующими натягами, повышает долговечность конструкций в 3 – 5 раз.

Цель. Определение влияния величины натяга в процессах дорнования отверстий в листовых заготовках из алюминиевого сплава Д16чТ, на напряжённо-деформированное состояние, энергосиловые показатели процесса и качественные характеристики обработанных отверстий.

Исследование

Для определения расчетным путем влияния величины натяга в процессах дорнования отверстий в листовых заготовках из алюминиевого сплава Д16чТ на напряжённо-деформированное состояние и энергосиловые показатели процесса необходимо использовать численное моделирование построенное, на пример, на основе метода конечных элементов (МКЭ). Производить такие расчеты позволяет программный комплекс DEFORM. Данный программный комплекс дает возможность решать задачи процессов обработки металлов давлением в осесимметричных и трехмерной постановках, а также позволяет определить закономерности формообразования с учетом конструктивных, технологических и физико-механических факторов [9, 10].

Решение задачи производили в упруго-пластической постановке. После разгрузки заготовки остаются уравновешенные остаточные напряжения, механизм образования которых определяется законом разгрузки.

Схема процесса дорнования с размерами деформирующего инструмента приведена на рис. 1. Заготовка 3, с предварительно полученным отверстием диаметром $D_{омб}$ под соответствующую величину натяга, устанавливается на матрицу 2. Дорн 1 проходит через отверстие в заготовке заходной частью, при этом он центрируется по матрице. К дорну 1 прикладывается усилие P_d . Изменение величины натяга обеспечивали изменением диаметра отверстия в заготовке. Соответствующий размер отверстия обеспечивает определенную величину натяга: 1% натяга соответствует диаметру отверстия 4,95 мм; 2% - диаметру отверстия 4,9 мм, а 3% - диаметру отверстия 4,85 мм.

Для исследования процесса дорнования была создана, конечно-элементная, модель процесса, которая представлена на рис.2. Рабочий инструмент дорн 1 и матрица 2 рассматривались как абсолютно жесткие тела. Заготовка 3 толщиной 5 мм с конечно элементной (КЭ) сеткой уплотнённой в области отверстия. Материал заготовки – алюминиевый сплав Д16чТ. Механические свойства, которого взяты согласно экспериментальных исследований [11]. Учет сил трения на контактных поверхностях задавали коэффициентом трения $\mu = 0,1$. Для решения задачи была использована модель материала упруго-пластическая. Упрочнение материала учитывалось по степенной аппроксимации диаграммы истинных напряжений. Процесс дорнования разбивался на определенное количество шагов нагрузки. Величина перемещения пуансона за один шаг составляет 0,01 мм. Скорость перемещения пуансона 2 мм/с.

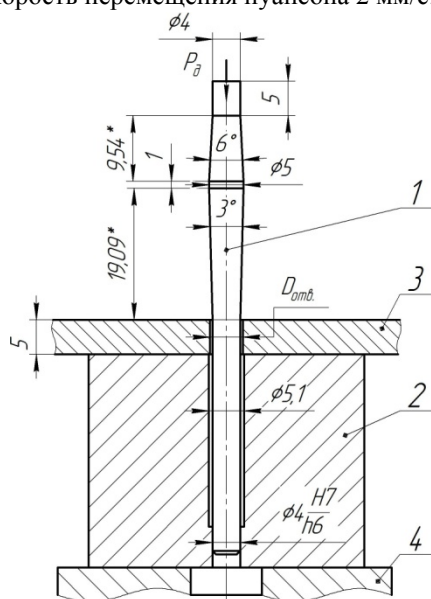


Рис. 1. Схема процесса дорнования с размерами деформирующего инструмента (1 - дорн, 2 - матрица, 3 - заготовка, 4 - опора)

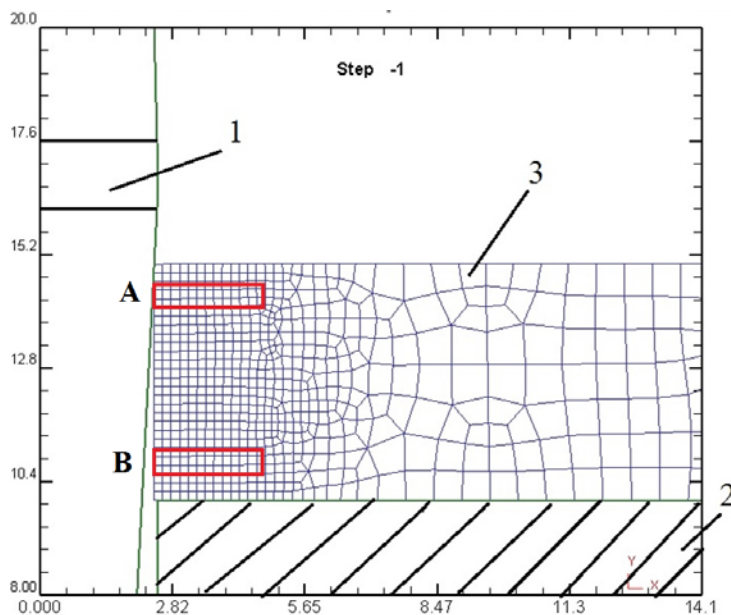


Рис. 2. Конечно-элементная модель процесса дорнования (1 - дорн, 2 - матрица, 3 - заготовка с КЭ сеткой)

Для проверки результатов численного моделирования была спроектирована и изготовлена оснастка. В качестве натурального эксперимента проведено исследования процесса дорнования отверстий в заготовках из алюминиевого сплава Д16чТ. Эксперимент проводили на испытательном стенде TIRA test 2300 с одновременной регистрацией усилия P с точностью 1Н и перемещения Δl с точностью 0,01 мм.

Сравнение расчетных и экспериментальных усилий от перемещения дорна при различных величинах натяга приведены на рис. 3. Максимальные значения усилий дорнования при соответствующем натяге составили: для натяга 3% расчетное значение 3,08 кН, экспериментальное – 2,95 кН; для натяга 2% расчетное

значение 1,60 кН, экспериментальное – 1,51 кН; для натяга 1% расчетное значение 1,65 кН, экспериментальное – 1,80 кН. Погрешность расчётных значений относительно экспериментальных не превышает 10%.

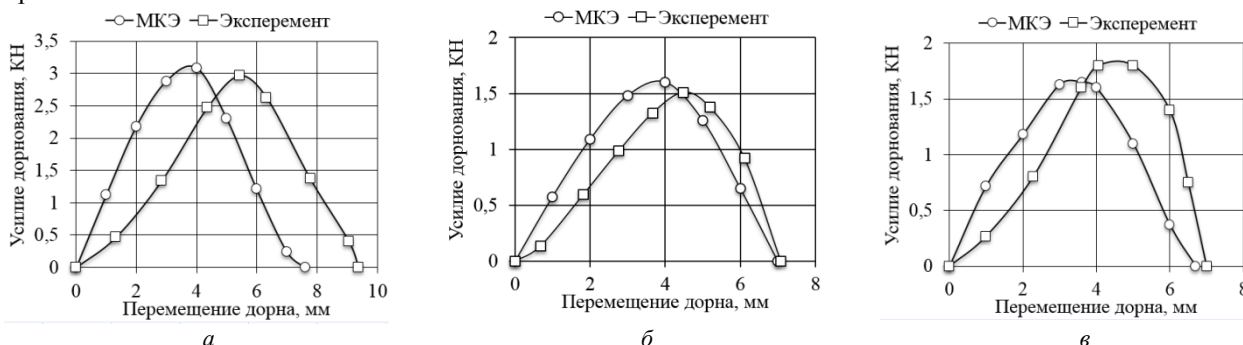


Рис. 3. Зависимости расчетных и экспериментальных усилий от перемещения дорна при различных величинах натяга: а – 3%, б – 2%, в – 1%

Изменение структуры материала за счет пластической деформации, возможно, оценить по распределению интенсивности деформации в объёме материала вокруг отверстия после дорнования с соответствующим натягом (рис. 4). Хотя и характер распределения, в сравнении с распределением поврежденности, равномерен по высоте отверстия, при этом величины интенсивности деформации очень малы. Для величины натяга 3% максимальное значение составило 0,093, при натяге 2% – 0,031 и при натяге 1% – 0,027 очаг максимальных значений интенсивности деформации сосредоточен у края отверстия со стороны входа дорна в отверстие. Изменение структуры обеспечивается, от боковой поверхности отверстия на глубину, по радиусу, соответственно величине натяга: при натяге 3% – 1,8 мм, при натяге 2% – 1,5 мм, и при натяге 1% – 1,2 мм.

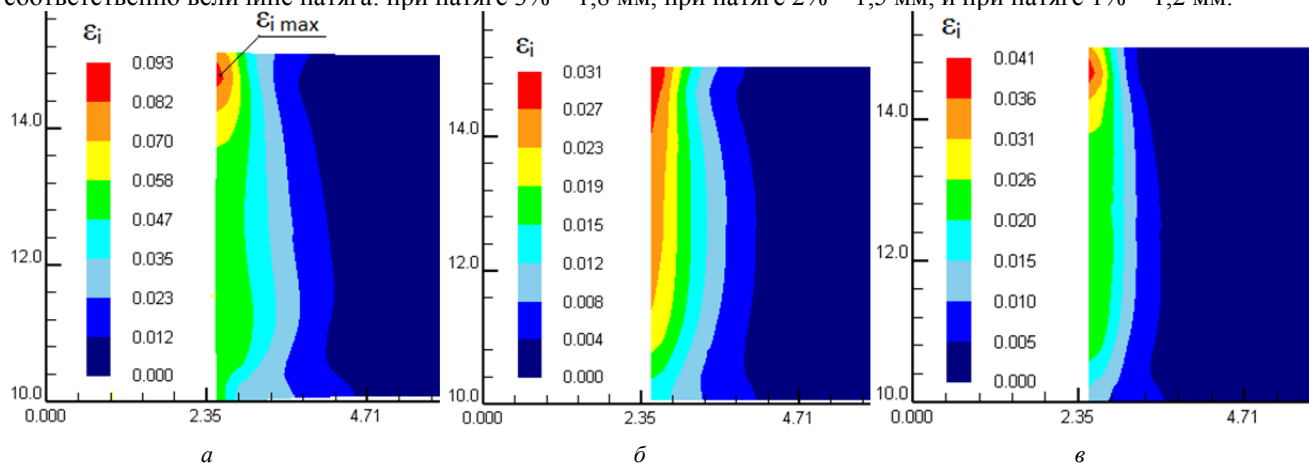
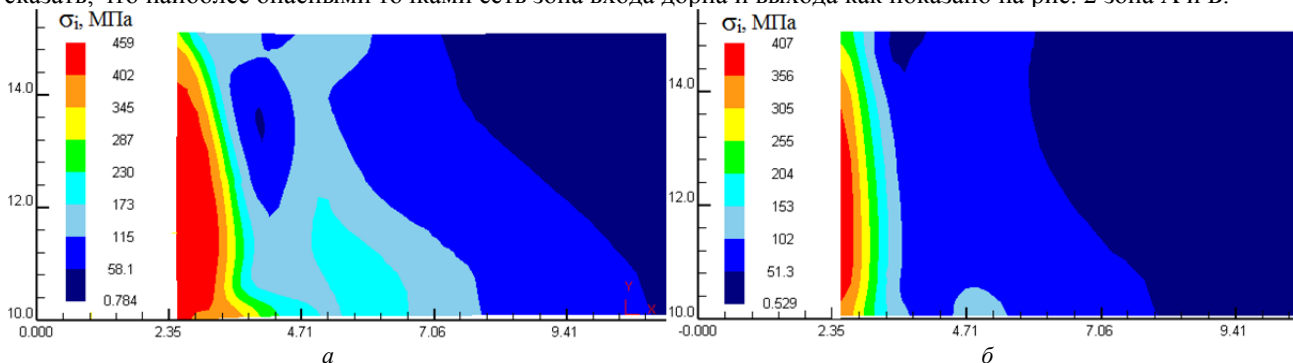


Рис. 4. Распределение интенсивности деформации ϵ_i , при различных величинах натяга: а – 3%, б – 2%, в – 1%

Путем проведения численного эксперимента МКЭ было определено поврежденность материала и его напряженно-деформированное состояние в зависимости от величины натяга.

Распределение полей остаточных напряжений в объёме материала после дорнования с соответствующим натягом приведены на рис. 5. Характер распределения по высоте цилиндрической поверхности отверстия не равномерен. Для натяга 3% максимальное значение составило 420 МПа, для натяга 2% максимальное значение составило 395 МПа, и для натяга 1% - 380 МПа. Проанализировав полученные результаты рис. 4 и 5 можно сказать, что наиболее опасными точками есть зона входа дорна и выхода как показано на рис. 2 зона А и Б.



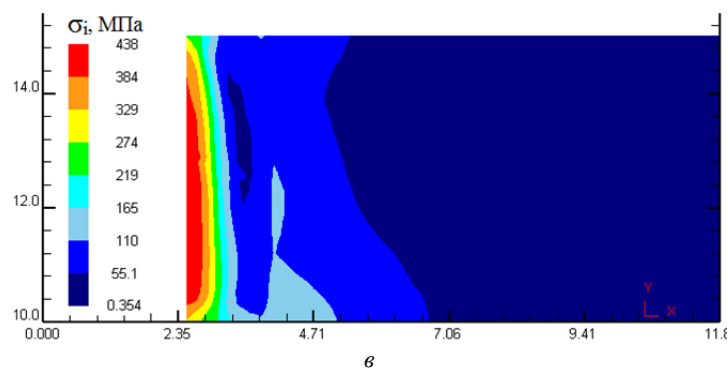


Рис. 5. Распределение полей остаточных напряжений в объёме материала после дорнования с соответствующим натягом: *a* – 3%, *b* – 2%, *в* – 1%

На рис.6 показано графики изменения интенсивности деформации ϵ_i в зависимости от удаления от цилиндрической части отверстия для зоны А и Б. Интенсивность деформации ϵ_i для зоны А и Б при 3 % величины натяга в 2 раза выше чем для 1 и 2% (рис.36, 6б), при этом кривые 1 и 2 близки между собой.

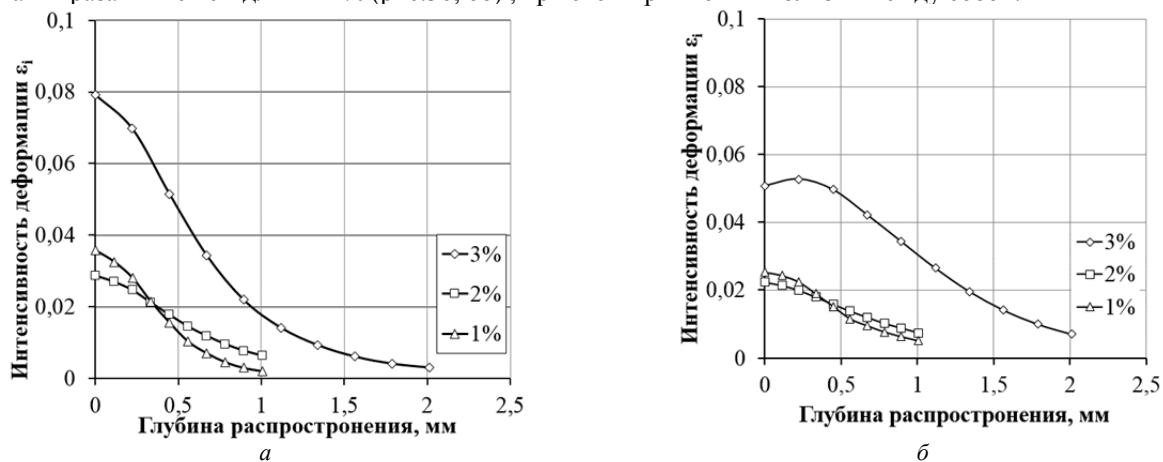


Рис. 6. Изменение интенсивности деформации ϵ_i , при различных величинах натяга 3%, 2%, 1%: *a* – для т. А, *б* – для т. Б

Поврежденность материала определялась через изменение модуля упругости при статическом нагружении при растяжении согласно [11, 12]:

$$D = 1 - \sqrt{\frac{E_i}{E_0}}$$

где, E_0 - исходный модуль упругости, E_i - текущий модуль упругости (при пластическом деформировании).

Распределение величины поврежденности D материала для зоны А и Б, при различных величинах натяга приведено на рис. 7. Проанализировав рис. 4 и учитывая зависимость величины поврежденности от величины

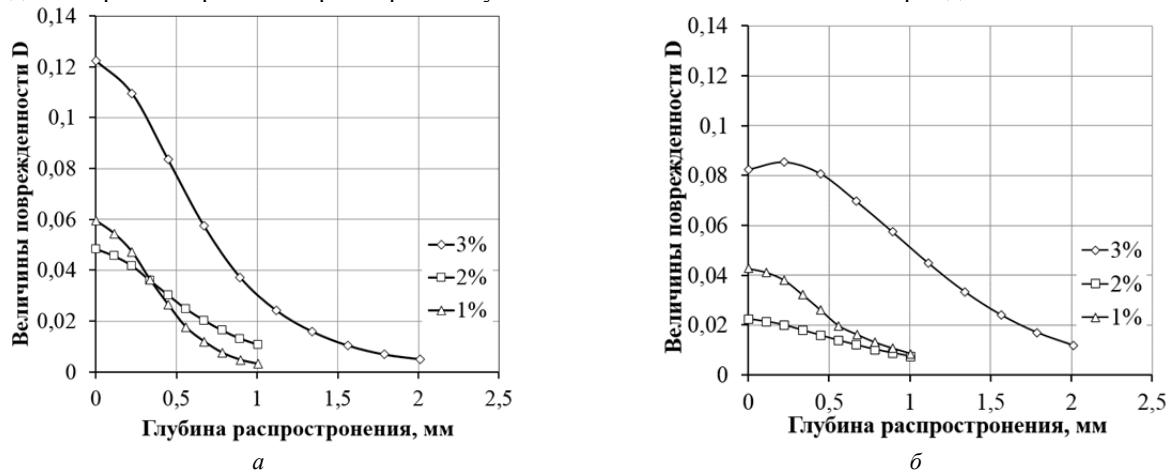


Рис. 7. Изменение величины поврежденности D материала вокруг отверстия, при различных величинах натяга 3%, 2%, 1%: *a* – для т. А, *б* – для т. Б

интенсивности деформации [11] получаем, что не зависимо от величины натяга, характер распределения поврежденности в объёме материала по высоте отверстия не равномерен. Со стороны входа дорна в отверстие заготовки (зона А), поврежденность D имеет большее значение и падает со стороны выхода дорна из отверстия. При величине натяга 3% максимальное значение составило 0,122, при натяге 2% – 0,048 и при натяге 1% – 0,059.

Кроме этого было установлено, что при дорновании происходит искажение геометрии поверхности заготовки. В местах входа и выхода дорна образуются наплывы материала вокруг отверстия. С увеличением натяга увеличиваются наплывы.

Экспериментальная оснастка для дорнования с заготовкой на испытательном стенде TIRA test 2300 показаны на рис. 8а и рис. 8б. В заготовках предварительно были получены отверстия путем механической обработки. Для обеспечения соответственных величин натяга отверстия диаметрами 4,85 мм, 4,90 мм и 4,95 мм (рис. 9а). Отверстие после дорнования показано на рис. 9б. В качестве технологической смазки использовали смесь индустриального масла И-40А, графит (мелкого помола) и дисульфид молибдена.



а



б

Рис. 8. Экспериментальная оснастка для дорнования с заготовкой на испытательном стенде TIRA test 2300 (а, б)



а



б

Рис. 9. Образцы с отверстиями под дорнование (а) и отверстие в образце после дорнования (б)

Выводы:

Проведено численное моделирование в программном комплексе DEFORM процесса дорнования отверстий в листовом материале толщиной 5мм из алюминиевого сплава Д16чТ. Расчет выполнен для натягов 1%, 2% и 3%. Расчетным путем установлено влияние величины натяга на максимальное значение усилия процесса. Для проверки результатов численного моделирования проведены экспериментальные исследования процесса дорнования отверстий в заготовках из алюминиевого сплава Д16чТ. Дорнование проводили на испытательном стенде TIRA test 2300. Была опробована экспериментальная смазка из смеси индустриального масла И-40А, графит (мелкого помола) и дисульфид молибдена. Расхождение расчетных данных с экспериментальными данными не превышает 10%. А также, расчетным путём было установлено влияние величины натяга на неравномерность распространения поврежденности в материале, напряженно-деформированное состояние материала после дорнования и искажение геометрии заготовки в местах входа дорна в отверстие и выхода из него.

Анотація.

Розглянуто спосіб обробки отворів для відповідальних деталей з алюмінієвого сплаву Д16чТ шляхом дорнування з різними величинами натягу. Представлені результати розрахунків методом скінченних елементів в програмному комплексі DEFORM. Розрахунковим шляхом встановлено вплив натягу, при дорнуванні, на напружено-деформований стан, розподіл пошкоджуваності в матеріалі навколо отвору і кінцеві форми і розмір після дорнування. Для перевірки результатів чисельного моделювання були проведені експериментальні дослідження дорнування отворів в заготовках з алюмінієвого сплаву Д16чТ з використанням для змащення суміші індустріального мастила І40, графіту (дрібного помелу) та дисульфід молібдену.

Ключові слова: дорнування; технологічний отвір; холодна деформація, натяг, міцність; пошкоджуваність, напружено-деформований стан.

Abstract.

Purpose. The impact of the magnitude of interference in the mandrelling processes of holes in workpieces made of aluminum alloy Д16чТ on the stress-strain state, energy-power parameters of the process and quality characteristics of processed holes was determined.

Design/methodology/approach. A method of processing holes for critical parts made of Д16чТ by mandrelling with different tightness values was proposed. The results of finite element analysis in the software package DEFORM were obtained. The impact of interference magnitude during mandrelling on the stress-strain state, the distribution of damage in the material around the hole and the final shape and size after mandrelling was determined by calculated method. For verification of numerical results the experimental studies of mandrelling of holes in workpieces made of aluminum alloy Д16чТ was carried out.

Findings. The effect of a tension in the energy-power parameters of the mandrelling process of holes in workpieces made of aluminum alloy Д16чТ, the uneven spread of damage to the material, the stress-strain state of the material after burnishing and distortion of the geometry of the workpiece in the place of the mandrel entrance into the hole and exit from the hole was calculated and experimentally established. The lubricant is the mixture of industrial oil I-40A, graphite (fine grinding) and molybdenum disulfide was taken for experimental study.

Originality/value. These materials are intended for the study of processes that allow improving the reliability and durability of aircraft details and designs with high reliability requirements.

Keywords: mandrelling; technological hole; cold deformation, tightness, durability; damage, defectiveness.

Библиографический список использованной литературы

1. Калюжний В.Л. Визначення параметрів зміцнення металу навколо отворів у листових заготовках із алюмінію / В.Л. Калюжний, І.П. Куліков, М.С. Ніколенко // Вісник НТУУ «КПІ»: серія «Машинобудування». – 2012. – № 66 – С. 165-172.
2. Калюжний О.В. Аналіз процесу формоутворення отворів у листових заготовках холодним видавлюванням двома конічними пуансонами / О.В. Калюжний // Обработка металлов давлением. – 2013. – №1 (34) – С. 106-113.
3. Семенцов, В.Ф. Влияние величины радиального натяга при дорновании и уровня нагружения при растяжении на характеристики локального напряженно деформированного состояния полосы с отверстием / В.Ф. Семенцов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2015. – № 67. – С. 123 – 134.
4. Семенцов, В.Ф. Анализ конструктивно-технологических методов повышения усталостной долговечности силовых элементов планера самолета в зоне функциональных отверстий / В.Ф. Семенцов // Проблемы тертя та зношування. – 2015. – № 1 (66). – С. 82 – 93.
5. Пширков В. Ф. Технология выполнения высокоресурсных соединений / В. Ф. Пширков, Я. Н. Робаковский, А. С. Тарасов и др. – М.: ЦАГИ, 1980. – 171 с.
6. Пекарш А. И. Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолётов / А. И. Пекарш, Ю. М. Тарасов, Г. А. Кривов и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. – 304 с.
7. Яхно Б.О. Чисельне моделювання залишкових напружень і пошкоджуваність після дорнування технологічних отворів в авіаційному сплаві Д16чТ / Б.О. Яхно // Вісник НТУУ «КПІ»:серія «Машинобудування». – 2015. – №1 (73) – С. 96-99.
8. Ясний П. Вплив параметрів дорнування функціональних отворів на втомну довговічність силових конструктивних елементів крила літака / П. Ясний, С. Гладь, В. Сочиляс та ін.// Збірник праць. Т.9: Сучасні проблеми техніки і технології / Тернопільський осередок Наукового товариства ім. Шевченка / відп. ред.: М. Андрейчин, ред. тому: П. Ясний. — Тернопіль : Астон, 2014. — Том 9. — С. 63-70.
9. Deform-3D – мощная система моделирования технологических процессов [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <http://www.thesis.com.ru/software/deform>.
10. User's manual DEFORM™ 3D Version 6.1.
11. Цибенко А. Г. Метод оцінки пошкоджуваності елементів конструкцій при простому навантаженні / А.Г. Цибенко, О.В. Тимошенко, В.В. Коваль // Загальноуніверситетська науково-технічна конференція, присвячена дню Науки. Секція Машинобудування. Підсекція Динаміка і міцність машин. – К.: НТУУ «КПІ», 2014 – с.23-24
12. Lemaitre J., Chaboche J.L. Mecanique des materiaux solides. Dunod, Mechanics of Solid Materials, Springer-Verlag, 1985, (English translation) 1987.

References

1. *Kalyuzhnyy V.L.* Vyznachennya parametriv zmitsnennya metalu navkolo otvoriv u lystovykh zahotvokakh iz alyuminiyu. V.L. Kalyuzhnyy, I.P. Kulikov, M.S. Nikolenko. Visnyk NTUU «KPI»: seriya «Mashynobuduvannya». 2012. No 66. P. 165-172.
2. *Kalyuzhnyy O.V.* Analiz protsesu formoutvorenniya otvoriv u lystovykh zahotvokakh kholodnym vydavlyuvannyam dvoma konichnymy puansonamy. O.V. Kalyuzhnyy. Obrabotka metallov davlenyem. 2013. No 1 (34). P. 106-113.
3. *Sementsov, V. F.* Vliyanie velichiny radialnogo natyaga pri dornovanii i urovnya nagruzheniya pri rastyazhenii na harakteristiki lokalnogo napryazhenno deformirovannogo sostoyaniya polosy s otverstiem . V. F. Sementsov. Problemi tertya ta znoshuvannya. 2015. No. 1 (66). P. 82 – 93.
4. *Sementsov, V.F.* Analiz konstruktivno-tehnologicheskikh metodov povyisheniya ustalostnoy dolgovechnosti silovyykh elementov planera samoleta v zone funktsionalnykh otverstiy . V.F. Sementsov. Problemi tertya ta znoshuvannya. 2015. No 1 (66). P. 82 – 93.
5. *Pshirkov V. F.* Tehnologiya vyipolneniya vyisokoresursnykh soedineniy. V. F. Pshirkov, Ya. N. Robakovskiy, A. S. Tarasov i dr. Moscow: TsAGI, 1980. 171 p.
6. *Pekarsh A. I.* Sovremennyye tehnologii agregatno-sborochnogo proizvodstva samoletov. A. I. Pekarsh, Yu. M. Tarasov, G. A. Krivov i dr. Moscow: Agraf-press, 2006. 304 p.
7. *Yahno B.O.* Chiselne modelyuvannya zalishkovykh napruzhen i poshkodzhuvanist pilsya dornuvannya tehnologichnykh otvoriv v avlatslynomu splavl. B.O. Yahno. Visnyk NTUU «KPI»: seriya «Mashynobuduvannya». 2015. No 1 (73). P. 96-99.
8. *Yasniy P.* Influence of functional holes burnishing parameters on the fatigue life of a constructive element of aircraft wing. Petro Yasniy, Sergii Glado, Viktor Skochylyas, Oleksandr Semenets. Proceedings. Vol.9: Modern problems of engineering and technology. Ternopil Branch of Shevchenko Scientific Society. Ternopil: Aston, 2014. Volume 9. P. 63-70.
9. *Deform-3D* – powerful system simulation processes [electronic resource]. Access mode: <http://www.thesis.com.ru/software/deform>.
10. *User's manual. DEFORMTM 3D Version 6.*
11. *Tsibenko A. G.* Metod otslnki poshkodzhuvanosti elementiv konstruktivnykh pri prostomu navantazhenii. A.G. Tsibenko, O.V. Timoshenko, V.V. Koval. Zagalnouniversitetska naukoivo-tehnlchna konferentsiya, prisvyachena dnyu Nauki. Sektsiya Mashynobuduvannya. Pidseksiya Dinamika i mltsn Ist mashin. Kyiv: NTUU «KPI», 2014. P. 23-24.
12. *Lemaitre J., Chaboche J.L.* Mecanique des materiaux solides. Dunod, Mechanics of Solid Materials, Springer-Verlag, 1985, (English translation) 1987.

Подана до редакції 09.10.2015