Дослідження ндс силових конструктивних елементів з функціональними отворами за одновісного циклічного розтягу / П. Ясній, С. Гладьо, П. Сидор, О. Семенець // Вісник ТНТУ — Тернопіль : ТНТУ, 2014. — Том 75. — № 3. — С. 7-14. — (Механіка та матеріалознавство).

УДК 539.3

П. Ясній, докт. техн. наук; С. Гладьо; П. Сидор; О. Семенець

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ НДС СИЛОВИХ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ОТВОРАМИ ЗА ОДНОВІСНОГО ЦИКЛІЧНОГО РОЗТЯГУ

Резюме. *Методом скінченних елементів обчислено одновісне пружно-пластичне деформування пластини з центральним деформаційно зміцненим отвором діаметром 8 мм, 10 мм після дорнування з натягом із алюмінієвого сплаву Д16чТ 1%, 2%, 3%. Побудовано розподіл розмаху локальних напружень* $\Delta\sigma_{yy}$*, максимальних та мінімальних напружень* σ_{yy}^{max} *та* σ_{yy}^{min} *в околі отвору залежно від кількості циклів навантаження та відносного натягу дорнування. У середній ділянці циліндричної поверхні отвору (*$Z = t/2$*) розрахункові локальні коефіцієнти асиметрії циклу у другому півциклі навантаження знижуються зі збільшенням відстані від краю отвору та зі збільшенням відносного натягу дорнування. Найменші локальні коефіцієнти асиметрії циклу навантаження R=-4…-5 для натягу дорнування 3% і сталі по товщині зразка (*$Z = 0 \ldots 6$ *мм).*

Ключові слова: *алюмінієвий сплав, функціональний отвір, дорнування, одновісне циклічне навантаження.*

P. Yasniy; S. Glado; P. Sydor; O. Semenets

RESEARCH OF STRESS STRAIN STATE OF POWER STRUCTURAL ELEMENTS WITH FUNCTIONAL HOLES UNDER UNIAXIAL CYCLIC LOADING

Summary. *Using finite element method taking advantage of the software module ANSYS Explicit Dynamics elastic-plastic deformation of the plate with 8 mm, 10 mm central strain hardened hole diameter with burnishing tension 1%, 2%, 3% have been calculated. To calculate the stress strain state in the threshold of the functional hole after burnishing with different tension and cyclic loading finite-element models of a quarter of the sample with a central hole were built. The load was applied to one surface of the edge of sample model and the other surface was fixed and limited by vertical movement (along the direction of application of force). The cyclic elastic-plastic deformation of aluminum D16chT alloy plate under of soft load at* $\sigma_{min} = 0$ *and* $\sigma_{max} = 147MPa$ *has been studied. Characteristics of mechanical properties are* $\sigma_{0,2} = 300MPa$ *and* $\sigma_B = 430MPa$ *. Scale distribution of local stresses* $\Delta\sigma_{yy}$*, maximum and minimum local stress* σ_{yy}^{max} *and* σ_{yy}^{min} *in the threshold of the hole depending on the number of loading cycles and burnishing tension has been built. Local stresses* σ_{yy}^{min} *and* σ_{yy}^{max}*, while calculating taking advantage of the finite element method has been stabilized already for two load half-cycles. The largest range of local stresses occur in the middle part of the hole thickness without burnishing (i = 0%,* $Z = t/2$*) and on the edge of the mandrel entrance after burnishing with the tension (1% ... 3%,* $Z = 0$ *). For burnished holes initiation and propagation of crack from the edge of the mandrel entrance are the characteristics. It is caused by the fact, that the compressive residual stresses caused by burnishing and the range of local strains for study of tightened burnishing (i = 1% ... 3%) on the hole edge are much smaller than in the middle part. Distribution of local coefficients of asymmetry of loading cycles* $R_{yy} = \sigma_{yy}^{min} / \sigma_{yy}^{max}$ *for burnishing tension 1%, 2%, 3% and without burnishing obtained by finite element calculation has been built. In the middle section of the cylindrical surface of the hole (*$Z = t/2$*) calculation local coefficients of asymmetry in the second half cycle load decrease with the increase of distance from the edge of the hole and with the increase of burnishing tension. Local load cycle asymmetry coefficients decrease with the threshold of depth of the cylindrical surface of the hole along the X axis for the average in*

depth section along the axis Z ($Z = t/2$) The smallest local load cycles of asymmetry coefficients R = -4 ... -5 are for burnishing tension 3% and are stable for all thickness of the sample ($Z = 0...6$ mm).

Key words: *aluminum alloy, functional hole burnishing, monaxonic cyclic loading.*

Постановка проблеми. Дуже чутливими ділянками елементів конструкцій до процесів утоми є місця, переріз яких ослаблений концентраторами напружень, наприклад отворами, виточками, зварними та заклепувальними швами, які водночас знаходяться під впливом внутрішніх напружень, а також зовнішнього експлуатаційного навантаження. Для підвищення втомної довговічності таких конструктивних елементів використовують різні технологічні методи обробки поверхневим пластичним деформуванням шару матеріалу [1–4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попередня пластична деформація істотно впливає на механічні властивості матеріалів та напружено-деформований стан (НДС) конструктивних елементів. Зокрема, послідовне застосування дорнування стінок отворів для перетікання палива з натягом 2% та бар'єрного обтискання у вигляді лунок сегментної конфігурації призводить до зниження максимальних головних напружень розтягу еквівалентного віднульового циклу у 1,54–1,63 раза, максимальних головних деформації – у 1,43–1,52 раза проти зразків без застосування деформаційного зміцнення отворів [5–6]. Для моделювання та аналізу НДС конструктивних елементів після циклічного навантаження ефективно застосовується моделювання методом скінчених елементів [7–9].

Зі збільшенням натягу дорнування зростають залишкові напруження стиску, а також ширина ділянки стискувальних напружень. З підвищенням натягу дорнування від 1% до 3% залишкові напруження стиску на циліндричній поверхні отвору підвищуються у 1,5–2 рази.

Для обґрунтування оптимальних параметрів дорнування з точки зору підвищення довговічності елементів конструкцій необхідно змоделювати напружено-деформований стан пластин з деформаційно зміцненими отворами за циклічного навантажування з урахуванням впливу відносного натягу дорнування.

Мета роботи. Методом скінченних елементів досліджено напружено-деформований стан елементів конструкцій із деформаційно зміцненими отворами за циклічного навантаження з урахуванням кінетики залишкових технологічних напружень.

Методика дослідження. Досліджували вплив дорнування отворів діаметром 8 мм та 10 мм у пластинах із алюмінієвого сплаву Д16чТ товщиною $t = 6мм$ та шириною робочої ділянки 60 мм на локальний напружений стан за циклічного пружно-пластичного деформування. Креслення зразків і дорна, а також методика дорнування детально описана в праці [4].

Для моделювання НДС отвору використовували комплекс нелінійної динаміки ANSYS Explicit Dynamics та модель Steinberg Guinan Strength для опису істинної діаграми пружно-пластичного деформування матеріалу Д16чТ. На рис.1 показані пружно-пластична ділянки діаграми деформування алюмінієвого сплаву Д16чТ, отримані експериментально та за допомогою моделі Steinberg Guinan Strength. Для розрахунку НДС в околі функціонального отвору після дорнування з різним відносним натягом та циклічного навантажування побудовано скінченно-елементну модель чверті досліджуваного плоского зразка з центральним отвором.

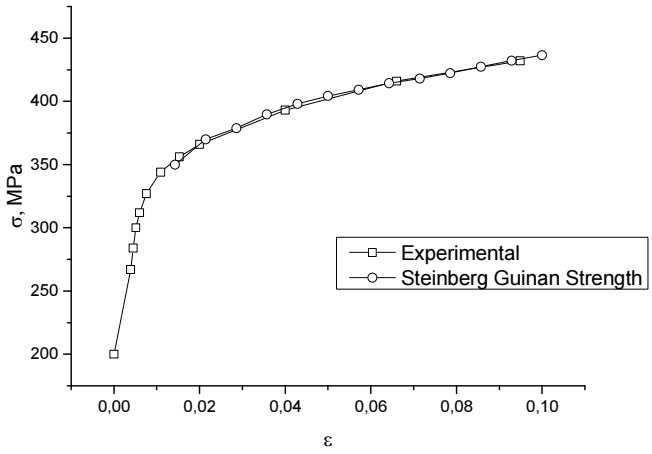


Рисунок 1. Діаграма пружно-пластичного деформування алюмінієвого сплаву Д16чТ

Figure 1. Diagram of elastic-plastic deformation of aluminum alloy D16chT

Для побудови сітки для моделей використовували елемент Solid95, який має властивості повзучості, пластичності та враховує зміну жорсткості при навантаженні, значні переміщення та деформації.

Зусилля прикладали до однієї поверхні краю моделі зразка, а іншу поверхню фіксували й обмежували її вертикальне переміщення (вздовж напрямку прикладання сили).

НДС аналізували за локальними максимальними напруженнями σ_{yy}^{max}, мінімальними напруженнями σ_{yy}^{min}, а також за локальним розмахом максимальних та мінімальних напружень $\Delta\sigma_{yy} = \sigma_{yy}^{min} - \sigma_{yy}^{max}$.

Розглядали циклічне пружно-пластичне деформування пластини з алюмінієвого сплаву Д16чТ в умовах м'якого навантаження при $\sigma_{min} = 0$ та $\sigma_{max} = 147MPa$. Характеристики механічних властивостей $\sigma_{0.2} = 300MPa$ та $\sigma_B = 430MPa$ [4].

Результати дослідження та їх обговорення. На рис.2 схематично зображено чверть робочої ділянки зразка з отвором та показано напрямок переміщення дорна.

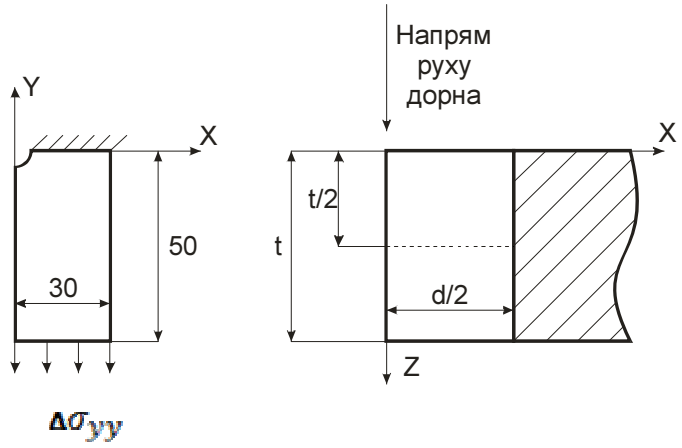


Рисунок 2. Схематичне креслення чверті робочої ділянки зразка

Figure 2. Schematic drawing of a quarter of the working area of the sample

На даній моделі досліджено НДС в околі отвору при циклічному навантажуванні, розподіли розмаху, максимальних та мінімальних напружень, асиметрію циклу навантаження залежно від величини відносного натягу дорнування отвору.

На рис.3 зображено розподіл локальних максимальних σ_{yy}^{max} та мінімальних σ_{yy}^{min} напружень в околі функціонального отвору діаметром 8 мм та натягу дорнування 1%, отриманих моделюванням методом скінченних елементів, від кількості півциклів навантаження на поверхні зразка з боку входу дорна () та середній частині циліндричної поверхні зразка ().

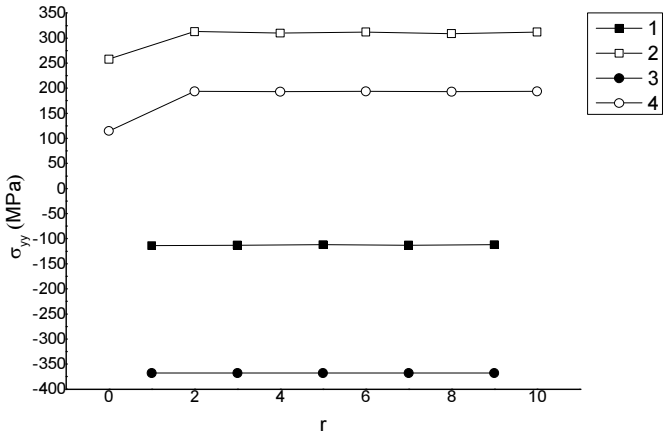
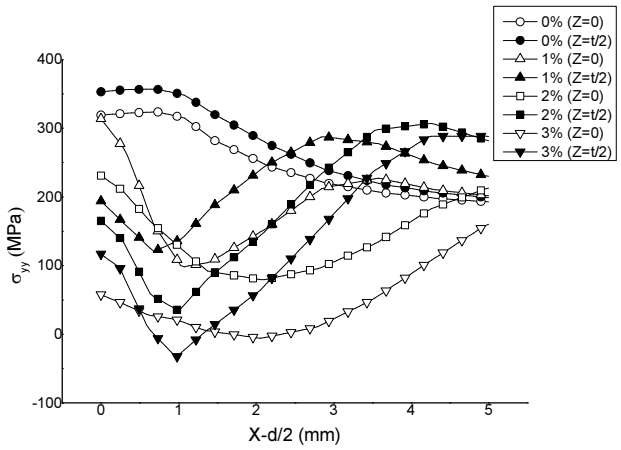


Рисунок 3. Залежність локальних мінімальних σ_{yy}^{min} (1,3) та максимальних σ_{yy}^{max} (2,4) напружень від кількості півциклів навантаження в околі функціонального отвору діаметром 8 мм за натягу дорнування 1%, (1,2), (3,4)

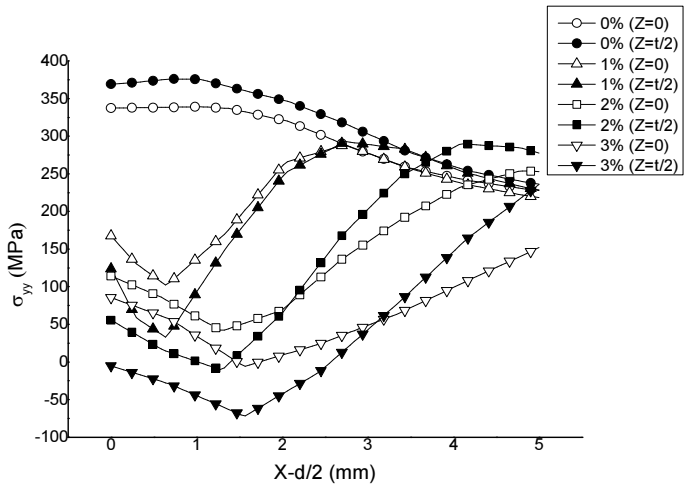
Figure 3. Dependence of the local minimum σ_{yy}^{min} (1,3) and the maximum σ_{yy}^{max} (2,4) stresses on the of half load cycles number in the threshold of the functional 8 mm hole diameter for burnishing tension 1%, (1,2), (3,4)

Оскільки локальні напруження σ_{yy}^{min} і σ_{yy}^{max} стабілізуються уже на 2 півциклі навантаження, то в подальшому моделювали НДС лише враховуючи 2 півцикли навантаження.

На рис.4 зображено розподіл локальних максимальних σ_{yy}^{max} та мінімальних σ_{yy}^{min} напружень в околі функціонального отвору діаметром 8 мм та 10 мм на поверхні зразка з боку входу дорна () та середній частині циліндричної поверхні зразка () для другого півциклу навантаження.



a

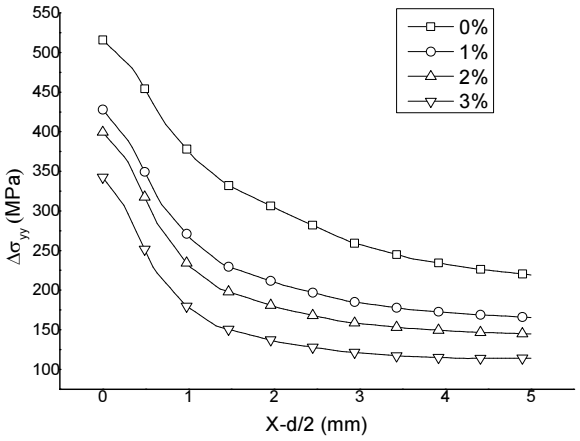


b

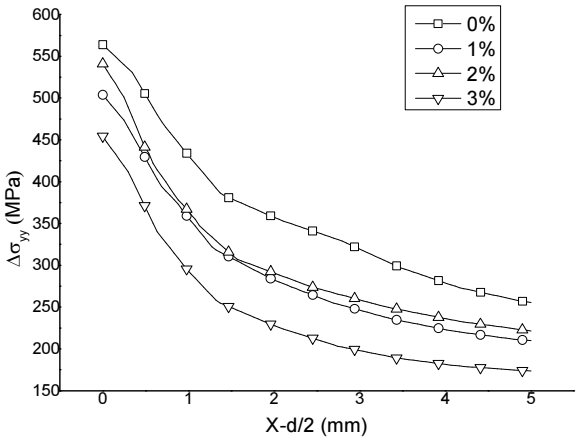
Рисунок 4. Розподіл локальних максимальних σ_{yy}^{max} та мінімальних σ_{yy}^{min} напружень в околі функціонального отвору діаметром 8 мм (а), 10 мм (б) на поверхні зразка з боку входу дорна () та середній частині циліндричної поверхні зразка ()

Figure 4. Distribution of local maximum σ_{yy}^{max} and minimum σ_{yy}^{min} stresses in the threshold of the functional 8 mm (a), 10 mm (b) diameter hole on the surface of the sample from the mandrel entrance () and the middle part of the cylindrical surface of the sample ()

На рис.5 зображено розподіл розмаху локальних напружень біля отворів діаметром 8 мм (рис.5а), 10 мм (рис.5б) для натягу дорнування 1%, 2%, 3% та без дорнування (0%) для другого півциклу. Обчислювали розподіл розмаху локальних напружень на поверхні зразка з боку входу дорна () та середній частині циліндричної поверхні зразка ().



a



b

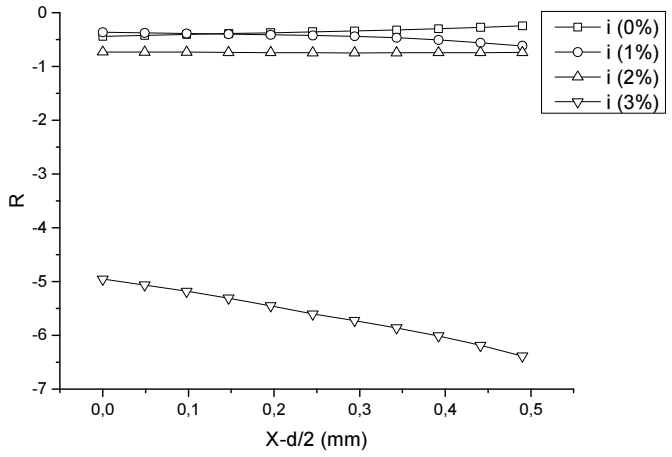
Рисунок 5. Графіки розподілу розмаху напружень для отворів діаметром 8 мм (а), 10 мм (б), натягів дорнування 1%, 2%, 3% та без дорнування (0%)

Figure 5. Graphics of the stress rate distribution for 8 mm (a) and 10 mm (b) diameter holes, burnishing tension of 1%, 2%, 3% and without burnishing (0%)

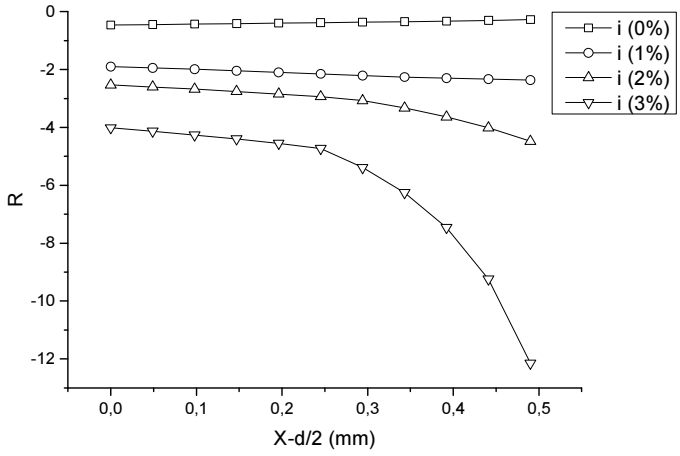
Із отриманих результатів випливає, що найбільший розмах локальних напружень виникає у середній частині по товщині отвору без дорнування (i=0%,). Це пояснює експериментальні дослідження, де тріщина зароджувалася та поширювалася в середній частині зразка () за одновісного розтягу.

Для дорнованих отворів характерним є зародження та поширення тріщини від кромки отвору з боку входу дорна. Це зумовлено тим, що залишкові напруження стиску спричинені дорнуванням, а також розмах локальних напружень для досліджених натягів дорнування (i=1%...3%) на кромці отвору значно менші, ніж у середній частині.

На рис.6 зображено розподіл локальних коефіцієнтів асиметрії циклу $R_{yy} =$ [illegible] навантаження біля отвору діаметром 8 мм за натягу дорнування 1%, 2%, 3% та без дорнування, отриманих моделюванням методом скінчених елементів. Розподіл локальних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження на поверхні зразка з боку входу дорна () та середній частині циліндричної поверхні зразка ().



a



b

Рисунок 6. Розподіл локального коефіцієнта асиметрії циклу навантаження біля отвору діаметром 8 мм за натягу дорнування 1%, 2%, 3% та без дорнування (0%):
а – ; б –

Figure 6. Distribution of the local cycle asymmetry factor near 8 mm diameter hole for burnishing tension 1%, 2%, 3% and without burnishing (0%):
a – ; b –

З рис.6 та 7 випливає, що у середній по товщині ділянці циліндричної поверхні отвору () локальні коефіцієнти асиметрії циклу навантаження знижуються із підвищенням відстані від краю отвору, а також відносного натягу дорнування (0%...3%). Для точок на поверхні зразка () в околі отвору діаметром 8 мм (рис.6б, рис.7а) спостерігається суттєве зниження локальних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження від натягу дорнування 3%. З рис.6 випливає, що локальні коефіцієнти асиметрії циклу навантаження знижуються зі збільшенням глибини від циліндричної поверхні отвору по осі X для середньої по глибині ділянки по осі Z ().

Висновки. Методом скінченних елементів за допомогою програмного модуля ANSYS Explicit Dynamics обчислено одновісне циклічне пружно-пластичне деформування пластини з центральним деформаційно зміцненим отвором діаметром 8 мм, 10 мм після дорнування з натягом 1%, 2%, 3%. Побудовано розподіл розмаху локальних напружень $\Delta\sigma_{yy}$, максимальних та мінімальних напружень σ_{yy}^{max} та σ_{yy}^{min} в околі отвору залежно від кількості циклів навантаження та відносного натягу дорнування. У середній ділянці циліндричної поверхні отвору ($Z = t/2$) розрахункові локальні коефіцієнти асиметрії циклу у другому півциклі навантаження знижуються зі збільшенням відстані від краю отвору та зі збільшенням відносного натягу дорнування. Найменші значення локального коефіцієнта асиметрії циклу навантаження $R_{\sigma yy} = -4 \dots -5$ для натягу дорнування 3% і сталі по товщині зразка ($Z = 0 \dots 6$ мм).

Conslusions. Using finite element method taking advantage of the software module ANSYS Explicit Dynamics elastic- plastic deformation of the plate with 8 mm and 10 mm central strain hardened hole diameter with burnishing tension 1%, 2%, 3% have been calculated. Scale distribution of local stresses $\Delta\sigma_{yy}$, maximum and minimum local stress σ_{yy}^{max} and σ_{yy}^{min} in the threshold of the hole depending on the number of loading cycles and burnishing tension has been built. In the middle section of the cylindrical surface of the hole () calculation local coefficients of asymmetry in the second half cycle load decrease with the increase of distance from the edge of the hole and with the increase of burnishing tension. Local load cycle asymmetry coefficients decrease with the threshold of depth of the cylindrical surface of the hole along the X axis for the average in depth section along the axis Z () The smallest local load cycles of asymmetry coefficients R = -4 ... -5 are for burnishing tension 3% and are stable for all thickness of the sample ($Z = 0 \dots 6$ mm).

Список використаної літератури

1. Pasta, S. Fatigue crack propagation from a cold-worked hole. Engineering Fracture Mechanics – 2007. – №74. – P.1525–1538.

2. Степанова, Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин [Текст] / Т.Ю. Степанова. – Иваново, 2009. – 64 с.

3. Ясній, П.В. Дослідження мікромеханізмів руйнування алюмінієвого сплаву Д16чТ після поверхневого зміцнення [Текст] / П.В. Ясній, С.В. Гладьо, А.П. Сорочак // Машинознавство. – 2013. – №3–4. – С.16–19.

4. Ясній, П. Вплив дорнування отворів на зародження та поширення втомних тріщин в алюмінієвому сплаві [Текст] / П. Ясній, С. Гладьо // Вісник Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – 2014. – №1. – С.7–17.

5. Экспериментальное исследование влияния последовательного применения дорнования и барьерного обжатия на усталостную долговечность стрингеров в зоне отверстий для перетекания топлива. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии [Текст] / А.Г. Гребеников, Г.А. Кривов, Е.Т. Василевский, В.А. Матвиенко, В.А. Резник, А.М. Гуменный, С.П. Светличный, И.П. Змиевской. – 2009. – №43. – С.54–64.

6. Конструктивно-технологические методы обеспечения высокоресурсных характеристик стрингеров баков-кессонов крыла в зоне отверстий для перетекания топлива. Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии [Текст] / Г.А. Кривов, А.Г. Гребеников, Е.Т. Василевский, В.А. Матвиенко, В.А. Резник, А.М. Гуменный, С.П. Светличный. – 2009. – №44. – С.51–66.

7. Басов, К.А. ANSYS: справочник пользователя [Текст] / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

8. Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера: механика разрушения [Текст] / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. – М.: Ленанд, 2008. – 456 с.

9. Дащенко, А.Ф. Ansys в задачах инженерной механики [Текст] / А.Ф. Дащенко, Д.В. Лазарева, Н.Г. Сурьянинов. – Одесса: Астропринт, 2007. – 488 с.

Отримано 27.05.2014