УДК 621.983

О. В. КАЛЮЖНИЙ

КОМБІНОВАНЕ ВИТЯГУВАННЯ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ВИРОБІВ ІЗ АЛЮМІНІЮ AL-3003 В ДВОХКОНУСНІЙ МАТРИЦІ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРОФІЛЯ

Методом скінченних елементів проведений аналіз комбінованого витягування із алюмінію AL-3003 вісесиметричних виробів в двоконусній матриці спеціального профіля без притискача. При витягуванні заготовок різного діаметра з однаковою товщиною встановлені раціональні профілі деформуючих поверхонь матриць та величини мінімальних односторонніх зазорів між матрицею і пуансоном, при яких деформування проходить без руйнування та отримуються вироби з максимальною висотою. Моделюванням виявлені енергосилові режими витягування, кінцеві форми і розміри виробів та напружено-деформований стан в здеформованих заготовках. Використання матриці спеціального профіля дозволяє зменшити кількість переходів витягування в порівнянні з традиційною двохконусної матрицею.

Ключові слова: комбіноване витягування, двохконусна матриця спеціального профіля, зазор між матрицею і пуансоном, комп'ютерне моделювання, метод скінченних елементів, зусилля витягування, форма і розміри виробів, ресурс пластичності здеформованого металу.

Вступ. Традиційне витягування вісесиметричних виробів із алюмінію та його сплавів в радіальних матрицях, які викладені в джерелах [1–4], не відповідають вимогам сучасного виробництва по продуктивності штампування та по точності форми і розмірів виробів. Використання комбінованого витягування в одноконусній і двохконусній матрицях дозволяє збільшити глибину витягування за один перехід та підвищити точність виробів завдяки потоншенню стінки при формоутворенні [5]. Вплив геометричної форми традиційної двоконусної матриці на процес формоутворення, форму і розміри виробів із сталі та зусилля деформування наведені в роботі [6]. Використання двохконусної матриці спеціального профіля, в якій деформуюча поверхня утворена перетином торів, дозволяє інтенсифікувати процес комбінованого витягування в напрямку збільшення ступеня деформації за один перехід та зменшення кількості переходів штампування [7, 8]. В роботі [9] приведена матриця з деформуючою поверхнею, яка суттєво зменшує вірогідність утворення складок при формоутворенні витягуванням. Однак, в літературних джерелах практично відсутні дані по витягуванню виробів із алюмінію в матриці спеціального профіля.

Метою даного дослідження є встановлення параметрів комбінованого витягування в двохконусній матриці спеціального профіля вісесиметричних виробів із листових заготовок різного діаметра з алюмінію AL-3003.

Схема комбінованого втягування в двоконусній матриці спеціального профілю показана на рис. 1. Вихідна листова заготовка 1 діаметром $D_З=2R_З$ встановлена в матриці 2. На відміну від традиційної двоконусної матриці, у матриці спеціального профіля деформуюча поверхня утворена перетином торів діаметром d, які розташовані з необхідними кроками l і n. Дотичні до деформуючої поверхні утворюють кути α та β. В місці перетину дотичних поверхонь матриця має діаметр $D_K=2R_K$. Перехід плоскої поверхні матриці 2 в конусну під кутом α відбувається на діаметрі $D_o = 2R_o$. Витягування виконується за допомогою пуансона діаметром $D_П=2R_П$ з радіусом заокруглення $r_п$. Для встановлення параметрів витягування використане комп'ютерне моделювання з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) та програми DEFORM. Застосована пружно-пластична модель формоутворення ізотропного металу із коефіцієнтом тертя μ = 0,08.

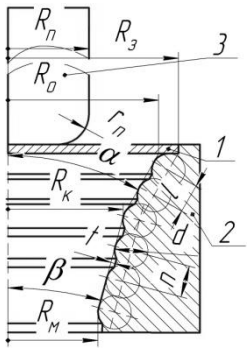


Рис. 1 – Схема витягування в двохконусній матриці

Витягуванню підлягали заготовки із алюмінію AL-3003, який має умовну межу текучості $\sigma_{0,2}$ = 80 МПа, діаметрами $D_З$ =110, 120, 130, 140 та 150 мм і товщиною S_O=1,7 мм. Діаметр пуансона $D_П$ з радіусом заокруглення $r_п$ $r_п$=15 мм вибирався в залежності від величини одностороннього зазору z між пуансоном і матрицею. Діаметр матриці D_K для вказаних заготовок був однаковий і складав D_K=59,2 мм. Деформуюча поверхня матриці утворена перетином торів діаметром d =11 мм, які розташовані з кроками $l \approx n$ =11 мм. Дотичні до деформуючої поверхні утворюють кути α =30º та β =15º по рекомендаціях джерела [5]. Розмір зазору t, який необхідний для запобігання утворення складок при формоутворенні виробів завдяки розвантаженню торця здеформованої заготовки, був величиною 1,5 мм. Діаметри матриці $D_o = 2R_o$ і $D_K=2R_K$ також визначалися згідно рекомендацій роботи [5] та для кожної заготовки мали різні значення. Для заготовки з $D_З$ =110 мм – D_o =99 мм і D_K=80 мм; з $D_З$=120 мм – D_o =108 мм і D_K=81 мм; з $D_З$=130 мм – D_o =117 мм і D_K=82 мм; з $D_З$=140 мм –

© О.В. Калюжний, 2015

D_o =126 мм і D_K=83 мм; з $D_З$ =150 мм – D_o =135 мм і D_K=84 мм. При даних розмірах в традиційній двохконусній матриці за один перехід можна отримати виріб із заготовки з $D_З$ =110 мм.

Розрахунком для кожного діаметра заготовки $D_З$ були встановлені мінімальні величини зазорів z, при яких витягування проходить без руйнування та отримуються вироби з максимальною висотою. При витягуванні заготовки діаметром $D_ç$=110 мм величина такого зазору склала z =0,9 мм. При цьому діаметр пуансона був $D_П$=57,4 мм. Для інших діаметрів заготовок отримано: для $D_З$ =120 мм – z =1 мм і $D_П$=57,2 мм; для $D_З$ =130 мм – z =1,1 мм і $D_П$=57 мм; для $D_З$ =140 мм – z =1,2 мм і $D_П$=56,8 мм; для $D_З$ =150 мм – z =1,3 мм і $D_П$=56,6 мм.

На рис. 2 показані розрахункові залежності зусилля витягування від переміщення пуансонів, які отримані при витягуванні заготовок різного діаметра. На стадії згинання заготовки і деформування по верхній конусній поверхні зусилля витягування зростає. Чим більший діаметр заготовки, тим менше зусилля згинання. Далі, при формоутворенні здеформованої заготовки в місці переходу верхнього конуса в нижній, зусилля дещо знижується. Зі збільшенням діаметра $D_З$ зусилля витягування та переміщення пуансона зростають.

Моделюванням встановлені причини руйнування здеформованої заготовки при витягуванні.

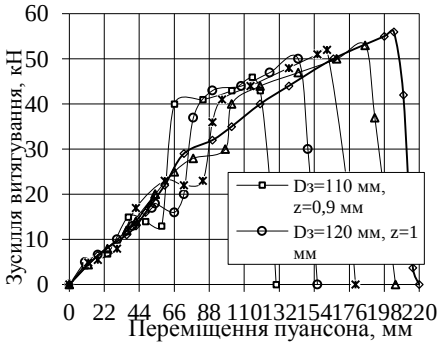
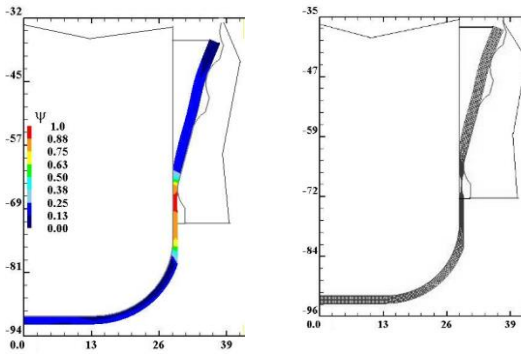


Рис. 2 – Залежності зусилля витягування від переміщення пуансона

Для прикладу, на рис. 3 зображена здеформована заготовка діаметром $D_З$=120 мм в момент руйнування. Розподіл ступеня використання ресурсу пластичності по об'єму заготовки у цей момент приведений на рис. 3, *а*. В стінці здеформованої заготовки виникає область, в якій повністю вичерпується ресурс пластичності здеформованого металу, досягаючи значення ψ =1. Це є причиною відриву донної частини заготовки (рис. 3, *б*).

Послідовність формоутворення виробу в матриці спеціального профіля із заготовки з $D_З$ =120 мм показана на рис. 4.



а б

Рис. 3 – Здеформована заготовка діаметром $D_З$ =120 мм в момент руйнування: а – розподіл ступеня використання ресурсу пластичності, б – відрив донної частини заготовки

Тонкими лініями зображений деформуючий інструмент. На початку витягування (рис. 4, *а*) заготовка деформується по поверхні верхнього конуса матриці. При цьому початку витягування (рис. 4, *а*) заготовка деформується по поверхні верхнього конуса матриці. При цьому торець здеформованої заготовки розвантажується та заповнює зазор величиною t =1,5 мм між виступами деформуючої поверхні матриці, що запобігає утворенню складок при витягуванні.

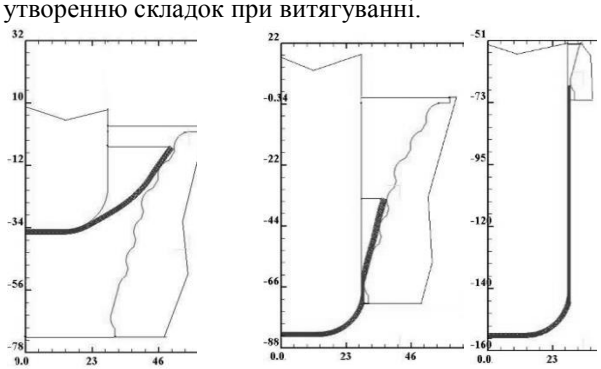
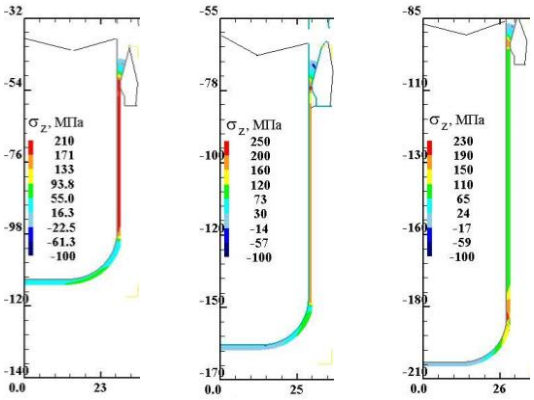


Рис. 4 – Послідовність формоутворення виробу в матриці спеціального профіля

На вичерпаний ресурс пластичності здеформованого металу в процесі витягування суттєво впливають розтягувальні осьові напруження σ_z, які виникають в стінці циліндричної частини здеформованої заготовки. Найбільші величини цих напружень мають місце при максимальному значенні зусилля витягування. На рис. 5 зображені розподіли вказаних напружень по об'єму здеформованих заготовок при витягування заготовок з $D_З$ =110, 130 та 150 мм. Максимальні зусилля витягування отриуються при торканні торців здеформованих заготовок бокової поверхні пуансона. В цей момент товщини стінок торців здеформованих заготовок для наведених діаметрів $D_З$ відповідно склали: 2,5; 2,7 та 2,9 мм. При витягуванні заготовки з $D_З$ =110 мм розтягувальні осьові напруження у стінці циліндричної частини знаходяться в межах σ_z =171÷210 МПа (рис. 5, *а*). У стінці на початку радіуса заокруглення донної частини величини цих напружень досягають значень σ_z =55÷93 МПа. При витягуванні заготовки

з $D_З$ =130 мм у стінці здеформованої заготовки, яка знаходиться в зазорі між матрицею і пуансоном, є невелика зона з величиною осьових напружень в межах σ_z =171÷210 МПа (рис. 5. *б*). При цьому у стінці на радіусі заокруглення донної частини здеформованої заготовки отримано σ_z =73÷120 МПа. Збільшення діаметра до $D_З$ =150 мм приводить до подальшого зменшення розтягувальних напружень у стінці, яка знаходиться в зазорі між матрицею та пуансоном.

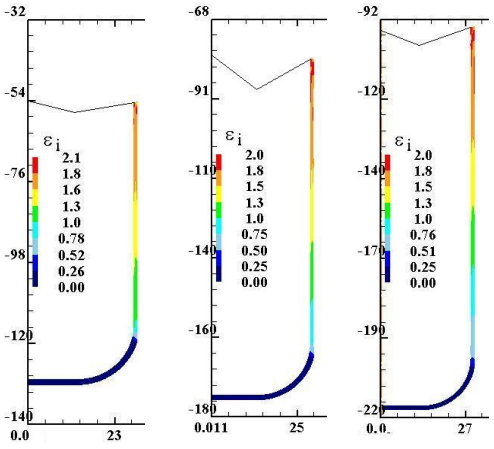


а б в

Рис. 5 – Розподіли осьових напружень σ_z у здеформованих заготовках при максимальному зусиллі витягування: а – $D_З$ =110 мм, б – $D_З$ =130 мм, в – $D_З$ =150 мм. Розміри по вісях в міліметрах

Тут отримано σ_z =55÷93 МПа. Але в місці переходу донної частини в циліндричну частину здеформованої заготовки виникає зона з розтягувальними напруженнями в межах σ_z =190÷230 МПа, що при зменшенні зазору між пуансоном та матрицею приводить до відриву донної частини

Пропрацювання структури металу холодною пластичною деформацією можна оцінити по розподілу інтенсивності деформацій. З іншої сторони по цьому розподілу та з використанням експериментальної діаграми істинних напружень модна прогнозувати механічні властивості здеформованого металу. На рис. 6 приведені розподіли інтенсивності деформацій ε_i у здеформованому металі після витягування заготовок з $D_З$=110, 130 та 150 мм. Вигляд розподілів практично однаковий для розглянутих діаметрів заготовок, але досягнуті величини ε_i дещо відрізняються. У стінці на радіусі заокруглення донних частин здеформованих заготовок значення інтенсивності деформацій знаходяться в межах ε_i =0,25÷0,51. Після витягування заготовки з $D_З$ =110 мм в зоні торця виникає інтенсивність деформацій в межах ε_i=1,6÷1,8 (рис. 6, а). Збільшення діаметра до $D_З$ =130 мм приводить до отримання в цьому місці зони з ε_i=1,8÷2,0 (рис. 6, б).



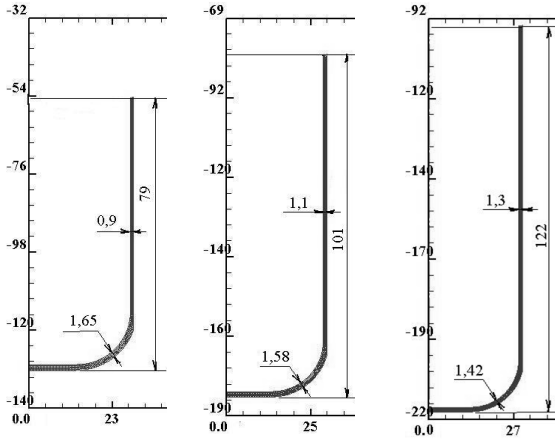
а б в

Рис. 6 – Розподіли інтенсивності деформацій у здеформованому металі після витягування заготовок різного діаметра: а – $D_З$ =110 мм, б – $D_З$ =130 мм, в – $D_З$ =150 мм. Розміри по вісях в міліметрах

Подальше зростання величини $D_З$ приводить до розширення вказаної зони по висоті циліндричної частини здеформованої заготовки (рис. 6, *в*).

Моделюванням встановлені кінцеві форми та розміри виробів після витягування. На рис. 7 зображені форма та розміри виробів, які отримані після витягування заготовок з $D_З$ =110, 130 та 150 мм.

Вироби, які отримані комбінованим витягуванням в матриці спеціального профілю мають однакову товщину стінки по всій висоті циліндричної частини. Зовнішній діаметр виробів має однакову величину 59,2 мм. Зі збільшенням діаметра заготовки зростає потоншення стінки на радіусі заокруглення пуансона та висота виробів. Після витягування заготовки з $D_З$=110 мм на радіусі заокруглення стінка потоншилася з вихідної товщини S_o =1,7 мм до 1,65 мм (рис. 7, *а*). Висота виробу склала 79 мм. Збільшення діаметра до величини приводить до товщини стінки 1,58 мм на радіусі заокруглення та до висоти виробу 101 мм (рис. 7, *б*). Після витягування заготовки діаметром $D_З$ =110 мм товщина стінки в указаному місці зменшилася до 1,42 мм, а висота виробу збільшилася до 122 мм. Необхідно відмітити, що після витягування заготовки $D_З$ =120 мм висота виробу склала 91 мм, а після витягування заготовки з $D_З$ =140 мм – 111 мм.

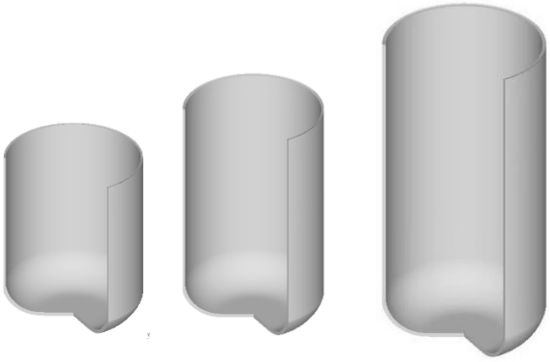


а б в

Рис. 7 – Форма та розміри в міліметрах виробів після витягування заготовок різного діаметра: а – $D_З$ = 110 мм, б – $D_З$ =130 мм, в – $D_З$ =150 мм
Розміри по вісях в міліметрах

Загальні вигляди виробів в розрізі, які отримані витягуванням із заготовок діаметром $D_З$ =110, 130 та 150 мм зображені на рис. 8.

По результатах розрахунків було спроектоване та виготовлене штампове оснащення для комбінованого витягування в матриці спеціального профілю. На рис. 9 зображений ескіз матриці спеціального профіля для витягування вісесиметричних виробів із заготовки $D_З$ =150 мм. На плиті 1 штампа встановлена витяжна матриця 2. На матриці 2 розміщені деформуючі вставки 3, 5, 7, 9, 11, 13 та 15, які виготовлені із штампових сталей.



а б в

Рис. 8 – Загальні вигляди виробів в розрізі виробів, які отримані після витягування заготовок різного діаметра: а – $D_З$ =110 мм, б – $D_З$ =130 мм, в – $D_З$ =150 мм

Між вставками розміщені кільця 2, 4, 6, 8, 10, 12 та 14 із середньовуглецевої сталі. Вставки і кільця центруються між собою та зафіксовані до плити 1 за допомогою обойми 16, шпильок 17, шайб 18 та гайок 19. В обоймі виконаний отвір для направлення пуансона відносно матриці, а у вставці 15 має місце паз для встановлення вихідної заготовки. Деталі 9–15 утворюють верхню деформуючу поверхню матриці спеціального профіля, дотична до якої складає кут α = 30º з віссю симетрії. А деталі 2–8 утворюють нижню деформуючу поверхню матриці з дотичною під кутом β =15º.

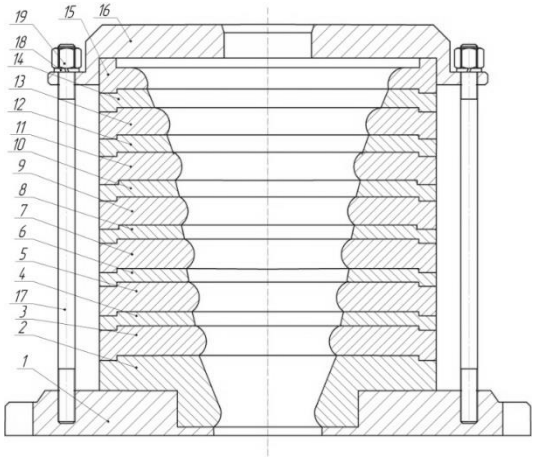


Рис. 9 – Ескіз матриці спеціального профіля

Фотографія матриці спеціального профіля, яка розміщена на проміжній плиті штампа для витягування, приведена на рис. 10. Штамп встановлюються на гідравлічний прес ДБ 2432 зусиллям 1,6 МН.

Рис. 10 – Фотографія матриці спеціального профіля, яка роміщена на поміжній плиті штампу для витягування

$D_З$ =110 мм $D_З$ =130 мм $D_З$ =150 мм

Рис. 11 – Деталі, які отримані із заготовок різного діаметра $D_З$

Результати експериметальних досліджень підтвердили розрахункові дані по зусиллю витягування, а також по можливості витягування виробів за один перехід. В традиційній двох конусній матриці мажна отримати за один перехід виріб тільки із заготовки з $D_З$ =110 мм. Деталі, які отримані із заготовок діаметром $D_З$ =110, 130 та 150 мм зображені на рис. 11.

Висновки. Методом скінченних елементів проведений розрахунковий аналіз комбінованого витягування в матриці спеціального профіля вісесиметричних виробів із заготовок різного

діаметра з алюмінію AL-3003. Встановлені величини мінімальних зазорів між матрицею та пуансоном, які дозволяють виконати формоутворення без руйнування та отримати вироби з найбільшою висотою. Моделюванням встановлені силові режими витягування, напружено-деформований стан в здеформованому металі та кінцеві форми і розміри виробів. По результатах розрахунків спроектоване та виготовлене штампове оснащення та проведені експериментальні дослідження по витягуванню дослідної партії виробів. Встановлено, що використання матриці спеціального профіля дозволяє. Скоротити кількість переходів витягування в порівнянні з традиційною двохконусною матрицею.

Список літератури: 1. *Романовский В. П.* Справочник по холодной штамповке. 6–е изд., перераб. и доп. / *В. П. Романовский*. – Ленингр. отд–ние: Машиностроение. 1979. – 520 с. **2.** Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка/ Под ред.. А.Д. Матвеева; Ред. совет: Е.И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985–1987. – 544 с. **3**. *Аверкиев Ю. А.* Холодная штамповка / *Ю. А. Аверкиев.* Издательство Ростовского университета , 1984. – 288 с. **4**. *Аверкиев Ю. А.* Технология холодной штамповки / *Ю. А. Аверкиев., А. Ю. Аверкиев.* – М: Машиностроение, 1989. – 304 с. **5.** *Валиев С. А.* Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов / *С. А. Валиев.* – М.: Машиностроение, 1973. – 176 с. **6.** *Калюжний В. Л.* Визначення оптимального кута двоконусної матриці для комбінованого витягування вісесиметричних виробів / *В. Л. Калюжний, А. С. Запорожченк*о // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво), Полтава, НТУ. – 2013. – №. 2(37), – С. 99–105. **7.** *Калюжний О.В.* Зменшення кількості переходів витягування вісесиметричних виробів з використанням матриці спеціального профілю / *О.В. Калюжний* // Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов, Краматорськ, ДГМА. – 2013. – №4 (37). – С. 93–97. **8**. *Калюжний О.В*. Зменшення зусилля та підвищення продуктивності формоутворення при комбінованому витягуванні вісесиметричних виробів / *О.В. Калюжний* // Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях». Харків.– 2013. – № 42. – С. 126–131.**9.** Патент 101348, Україна, МПК (2015) B21F 1/00. Спосіб витягування порожнистих виробів в профільованій матриці / *О.В.Калюжний, Я.С. Олександренко, І.П. Куліков*. – Заяка № u201101215, заявл. 2.03.2015, опубл. 10.09.2015, Бюл. №17.

Bibliography (transliterated): 1. *Romanovskiy V. P.* Spravochnik po holodnoy shtampovke. 6–e izd., pererab. i dop. / *V. P. Romanovskiy* . – Leningrad. otd–nie: Mashinostroenie. 1979. – 520 p. **2.** Kovka i shtampovka: Spravochnik: Vol. 4. Listovaya shtampovka/ Pod red.. A.D. Matveeva; Red. sovet: E.I. Semenov (pred.) i dr. – Moscow: Mashinostroenie, 1985–1987. – 544 p. **3.** *Averkiev Yu. A.* Holodnaya shtampovka / *Yu. A. Averkiev*. Izdatelstvo Rostovskogo universiteta , 1984. – 288 p. **4.** *Averkiev Yu. A.* Tehnologiya holodnoy shtampovki / *Yu. A. Averkiev., A. Yu. Averkiev.* – Moscow: Mashinostroenie, 1989. – 304 p. **5.** *Valiev S. A.* Kombinirovannaya glubokaya vyityazhka listovyih materialov / *S. A. Valiev*. – Moscow.: Mashinostroenie, 1973. – 176 p. **6.** *Kalyuzhniy V. L.* Viznachennya optimalnogo kuta dvokonusnoii matritsi dlya kombInovanogo vityaguvannya vIsesimetrichnih virobiv / *V. L. Kalyuzhniy, A. S. Zaporozhchenko* // ZbIrnik naukovih prats (galuzeve mashinobuduvannya, budivnitstvo), Poltava, NTU. – 2013. – No 2(37),. – P. 99–105. **7.** *Kalyuzhniy O.V.* Zmenshennya kilkostI perehodiv vityaguvannya visesimetrichnih virobIv z vikoristannyam matritsI spetsIalnogo profilyu / *O.V. Kalyuzhniy* // Obrabotka materialov davleniem. Sbornik nauchnyih trudov, Kramatorsk, DGMA. – 2013. – No4 (37). – P. 93–97. **8.** *Kalyuzhniy O.V.* Zmenshennya zusillya ta pIdvischennya produktivnosti formoutvorennya pri kombnovanomu vityaguvanni visesimetrichnih virobiv / *O.V. Kalyuzhniy* // Visnik NTU «KHPI», SerIya «Novi rishennya v suchasnih tehnologiyah», Kharkiv. – 2013. – No 42. – P. 126–131. **9.** Patent. 101348? Ukraina, MPK (2015) V21F 1/00. Sposib vityaguvannya porozhnistih virobIv v profIlovanIy matritsI / *O.V.Kalyuzhniy, Ya.S. Oleksandrenko, I.P. Kulikov*. – Zayaka No u201101215, zayavl. 2.03.2015, opubl. 10.09.2015, Byul. No17.

Надійшла (received) 05.02.2015

Відомості про авторів / About the Authors

Калюжний Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів; тел.: (067) 771-88-62; e-mail: Av-k@ukr.net.

Kljuzhny Oleksandr Vladimirovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Dynamics and durability of machines and resistance materials Kyiv; tel.: (067) 771-88-62; e-mail: Av-k@ukr.net.