

DOI 10.32820/2079-1747-2020-26-79-88

УДК 621.7.044

**АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ В КЛЕЙОВОМУ ШАРІ З'ЄДНАННЯ
ЕЛЕМЕНТІВ НАПРЯМНОЇ СИСТЕМИ УСПШ****Фролов Е.А.¹, Муравльов В.В.², Дерябкина Е.С.³, Агарков В.В.⁴***Полтавський національний технічний університет імені Ю. Кондратюка¹**Полтавський державний аграрний університет²**Українська інженерно-педагогічна академія³**Державне підприємство «Харківстандартметрологія»⁴***Інформація про авторів:**

Фролов Євгеній Андрійович: ORCID 0000-0002-9415-1066, naumova olga1@mail.ru; доктор технічних наук, професор; професор кафедри технології машинобудування; Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка; Першотравневий проспект, 24, м. Полтава, Україна.

Муравльов Володимир Вячеславович: ORCID: 0000-0002-3221-0411; mvv02021975@ukr.net; кандидат технічних наук; доцент кафедри галузеве машинобудування; Полтавський державний аграрний університет; вул. Сквороди, 1/3, м. Полтава, 36003, Україна.

Дерябкина Євгенія Станіславівна: ORCID 0000-0002-5531-0124, 216464 @ mail.ru кандидат технічних наук; доцент кафедри машинобудування, транспорту і зварювання; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська 16, м. Харків, Україна.

Агарков Віктор Васильович: ORCID 0000-0001-9883-0480; 290@mti.kharkov.ua; кандидат технічних наук; заступник директора, начальник лабораторії; Державне підприємство "Харківстандартметрологія", вул. Мירוносицька, 36, м. Харків, 61003, Україна.

Метою досліджень було створення надійних методів аналітичного розрахунку напружень у клейовому шарі з'єднання напрямна колонка - втулка (обойма) в конструкції універсальної складальної переналагоджуваної штампової оснастки. Встановлено, що товщина клейового шару може бути від декількох десятків дольових міліметрів до 0,5-1,2 мм, при цьому епоксидний клей має модуль пружності у 100 раз менше, ніж модуль пружності матеріалів обойми або спрямовуючої колонки. Використовуючи закон Гука вважаємо, що матеріал клею, який затвердів, однорідний, ізотропний і фізично лінійний. Враховуючи, що маємо симетричне навантаження і рівномірність у клейовій поверхні, отримали напруження у деякій точці поверхні, яка виражається системою рівнянь. Таким чином, формули, які отримали, дозволяють визначити максимальну величину переміщення направляючої колонки УСПШ під дією горизонтального зусилля, а також привести розрахунок на міцність клейової поверхні у будь-якій точці поверхні, розташованій під кутом. Встановлено, якщо для матеріалу клею, який затвердів, виконується умова $\sigma \leq [\sigma]$, то міцність клейового прошарку забезпечена. В іншому випадку необхідно або замінити горизонтальну складову зусилля штампування або збільшити діаметр направляючої колонки і вишину клейового з'єднання.

Ключові слова: направляюча колонка, втулка, клейове з'єднання, напруження, зусилля штампування, універсально - збірний переналагоджуваний штамп.

Фролов Е.А., Муравльов В.В., Дерябкина Е.С., Агарков В.В. „Аналитическое определение напряжений в клеевом слое соединения элементов направляющей системы УСПШ“

Целью исследований было создание надежных методов аналитического расчета напряжений в клеевом слое соединения направляющая колонка - втулка (обойма) в конструк-

ции универсально-сборной переналаживаемой штамповой оснастки. Установлено, что толщина клеевого слоя может быть от нескольких десятых долей миллиметров до 0,5-1,2 мм, при этом эпоксидный клей имеет модуль упругости в 100 раз меньше, чем модуль упругости материалов обоймы или направляющей колонки. Используя закон Гука полагаем, что материал затвердевшего клея, однородный, изотропный и физически линейный. Учитывая, что у нас симметричные нагрузки и равномерность в клеевой поверхности, получили напряжения в некоторой точке поверхности, которая выражается системой уравнений. Таким образом, полученные формулы позволяют определить максимальную величину перемещения направляющей колонки УСПШ под действием горизонтального усилия, а также привести расчет на прочность клеевой поверхности в любой точке поверхности, расположенной под углом. Установлено, если для материала затвердевшего клея выполняется условие $\sigma \leq [\sigma]$, то прочность клеевого слоя обеспечена. В противном случае необходимо либо заменить горизонтальную составляющую усилия штамповки или увеличить диаметр направляющей колонки и толщину клеевого соединения.

Ключевые слова: направляющая колонка, втулка, клеевое соединение, напряжения, усилие штамповки, универсально - сборный переналаживаемый штамп.

Frolov E., Muravlyov V., Deryabkina E., Agarkov V. "Analytical determination of stresses in the adhesive layer of joining elements of the USPSh guide system".

The aim of the research was to create reliable methods of analytical calculation of stresses in the adhesive layer of the connection of the guide column – sleeve (holder) in the design of the universal assembly reconfiguration stamping equipment. It is established that the thickness of the adhesive layer can be from a few tenths of a millimeter to 0.5-1.2 mm, while the epoxy adhesive has a modulus of elasticity 100 times less than the modulus of elasticity of the materials of the clamp or guide column. Using Hooke's law, we assume that the hardened adhesive material is homogeneous, isotropic, and physically linear. Given that we have a symmetrical load and uniformity in the adhesive surface, we obtained stresses at some point on the surface, which is expressed by a system of equations. Thus, the formulae obtained allow determining the maximum value of the movement of the USPSh guide column under the action of horizontal force, as well as calculating the strength of the adhesive surface in any angled point of the surface. It is established that if the condition $\sigma \leq [\sigma]$ is fulfilled for the hardened adhesive material, then the strength of the adhesive layer is provided. Otherwise, it is necessary to either replace the horizontal component of the stamping force or increase the diameter of the guide column and the height of the adhesive joint.

Keywords: guide column, sleeve, adhesive connection, tension, stamping force, universally folded adjustable stamp.

Вступ

Як показала практика, технологічна собівартість універсально - збірною переналагоджуваного штамп (УСПШ) складає 7-12% від вартості спеціального штамп, що дозволяє розширити межі економічно доцільного використання штампування у діапазоні 50-2000 деталей у рік.

Строк роботи основних елементів УСПШ складає 10-12 років, час на проектування, переналадування і складання універсально - збірному переналагоджуваного штампу складає 2-8 годин.

Таким чином, система УСПШ змінює старі методи технологічної підготовки виробництва нових виробів і дозволяє використати у широкому масштабі прогресивний метод листового штампування деталей в умовах одиничного і дрібносерійного виробництва.

В зв'язку з цим особливе значення набуває правильний вибір оптимальних, науково - обґрунтованих конструктивних параметрів УСПШ, матеріалів для їх виготовлення, дослідження надійності і довговічності окремих вузлів УСПШ [1-4].

На деяких машинобудівних підприємствах при виготовленні блоків штампів використовується клейове з'єднання направляючих елементів. Цей спосіб значно скорочує трудомісткість виготовлення штампової оснастки. Крім того, при клейовому методі досягається висока точність установки колонок у штаповому блоці. У даний час відсутні які-небудь аналітичні матеріали і рекомендації по вибору параметрів клейового з'єднання [5-9].

Постановка проблеми

Одним з основних питань конструювання УСПШ є науково - обґрунтований вибір способу закріплення направляючих колонок (рис.1).

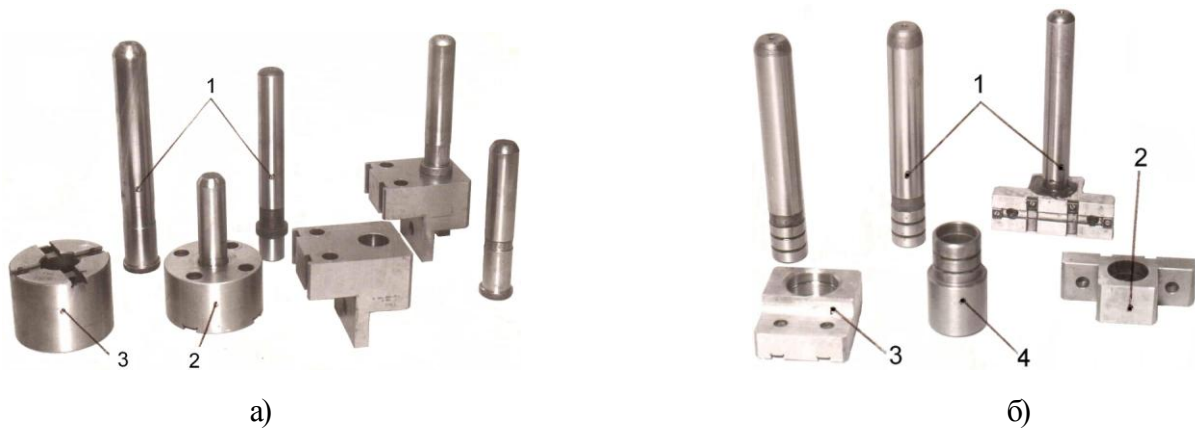


Рис. 1 - Направляючі елементи: а – УСШ-16; б – УСШ-8: 1 – направляюча колонка; 2 – нижня обойма; 3 – верхня обойма; 4 – направляюча втулка

Необхідно відмітити, що питанням досліджень вибору способу закріплення системи направлення у конструкціях штампів у вітчизняній і закордонній літературі приділяється недостатньо уваги. Більшість рекомендацій носить чисто прикладний характер і часто не підкріплюється якими-небудь експериментами. Дослідження конструкторських і технологічних основ системи направлення і її вплив на працездатність універсально - збірних переналагоджуваних штампів є актуальною науково-технічною задачею, яка представляє наукову і практичну цінність.

Мета досліджень - провести дослідження по аналітичному визначенню напружень у клейовому шарі з'єднання напрямна колонка-втулка (обойма) в конструкції універсально - збірному переналагоджуваного штампу.

Основний матеріал

В універсально - збірних переналагоджуваних штампах напрямна колонка з'єднується з нижньою обоймою нерухомо шляхом склеювання. Товщина клейового шару може бути від кількох десятих часток міліметра до 0,5-1,2 міліметра. Застосовуваний епоксидний клей має модуль пружності в 100 разів менший, ніж модулі матеріалів обойми або направляючої колонки [6-10].

Вважаючи, що, внаслідок малого модуля пружності клею, деформації колонки і обойми малі, в порівнянні з деформацією шару клею, ми приходимо до розрахункової схеми (рис.2), коли колонка і обойма є абсолютно жорсткими, а клей пружним.

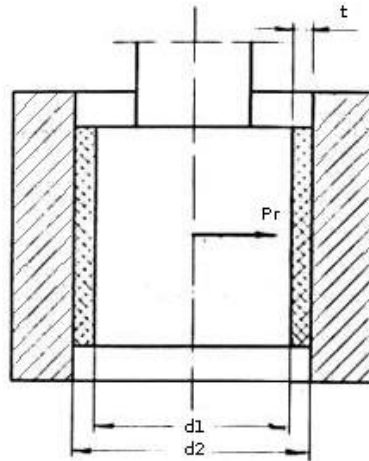


Рис.2 - Розрахункова схема клейового з'єднання

В процесі експлуатації внаслідок неточності збірки штампа, нерівномірності зазору між пуансоном і матрицею, похибки, що вносяться повзуном преса на напрямні колонки, а отже, і на клейовий шар, діє горизонтальне зусилля P_r . Силами тертя, що виникають між мастильними поверхнями колонки і втулки нехтуємо. Таким чином, приходимо до схеми плоского напруженого стану клейового шару. Розглянемо радіальне переміщення колонки від дії сили P_r (рис. 3).

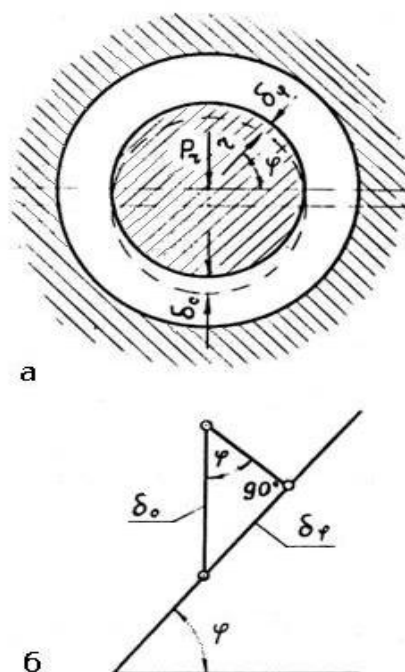


Рис.3 - Деформація клейового шару від радіальної сили

Колонка під дією сили переміститься, а клейовий шар деформується на величину сили δ_a . Переміщення довільної точки клею, що належить одночасно і колонці, буде визначати формулою:

$$\delta_\varphi = \delta_a \cdot \sin \varphi \quad (1)$$

де δ_a - максимальне радіальне переміщення колонки від сили P_r ; φ - поточний центральний кут, що визначає положення даної точки.

Внаслідок деформації шару клею, в ньому виникнуть напруги (рис.4).

Максимальна відносна деформація клейового шару визначається відношенням:

$$\varepsilon_r = \frac{\delta_a}{t} \quad (2)$$

де t - товщина клейового шару.

А $\varepsilon_\theta = 0$, вважаючи на абсолютну жорсткості колонки і обойми.

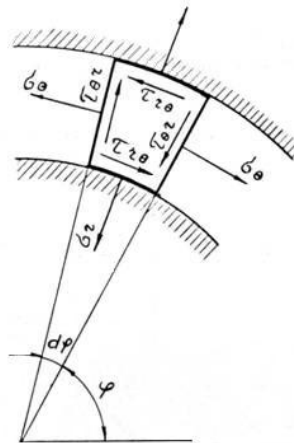


Рис.4 – Напружений стан елемента клею

Як було показано, товщина клейового шару не перевищує 1,2 мм. З аналізу конструкції з'єднання «колонка-обойма» випливає, що довжина кола направляючої колонки, а, отже, і клейового шару, становить від 63 до 126 мм, тобто в 50 - 100 разів більше шару клею. Таким чином, розглядається випадок, коли t мало в порівнянні з довжиною окружності клейового шару. Визначимо кут зсуву елемента клею $\gamma_{r\theta}$ вважаючи його сталим по товщині з огляду на мале значення t , (рис.5).

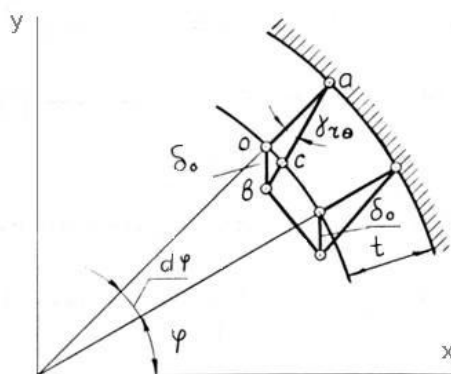


Рис. 5 – До визначення кута зсуву

З рис. 5 випливає, що $\angle COB = \varphi$, як кути із взаємно-перпендикулярними сторонами. З прямокутного трикутника слідує

$$OC = OB \cdot \cos \varphi$$

$$\text{або } OC = \delta_o \cdot \cos \varphi.$$

$$\text{Тоді } \gamma_{r\theta} = \frac{OC}{t} \text{ або}$$

$$\gamma_{r\theta} = \delta_a \cdot \frac{\cos \varphi}{t} \quad (3)$$

$$\text{для } \varphi = 0 \quad \gamma_{r\theta} = \frac{\delta_a}{t}$$

$$\text{для } \varphi = \frac{\pi}{2} \quad \gamma_{r\theta} = a$$

Крім цього, в розглядуваній задачі

$$\gamma_{rz} = \gamma_{\theta z} = a$$

Знаючи компоненти деформованого стану, можна визначити виникаючі при цьому напруження.

Закон Гука для розглянутого плоского напруженого стану має вигляд

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\delta_r - \mu\delta_\theta);$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\delta_\theta - \mu\delta_r); \quad (4)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{G}\tau_{r\theta}$$

При постановці завдання вважаємо, що матеріал клею, який затвердів, однорідний, ізотропний і фізично лінійний.

Вирішуючи спільно два перших рівняння системи (3), отримаємо:

$$\delta_r = \frac{E(\varepsilon_r + \mu\varepsilon_\theta)}{1 - \mu^2}$$

$$\delta_\theta = \frac{E(\varepsilon_\theta + \mu\varepsilon_r)}{1 - \mu^2} \quad (5)$$

а з останнього рівняння слідує, що

$$\tau_{r\theta} = G\gamma_{r\theta}, \quad (6)$$

де δ_r – радіальне напруження; δ_θ – тангенціальне напруження; $\tau_{r\theta}$ – дотичне напруження; E – модуль пружності I роду; G – модуль пружності II роду; μ – коефіцієнт Пуассону.

З урахуванням (1) і (2) вирази (5) і (6) запишуться в такий спосіб (максимальні значення):

$$\delta_r = \frac{E \frac{\delta_a}{t}}{1 - \mu^2}$$

$$\delta_\theta = \frac{E \mu \frac{\delta_a}{t}}{1 - \mu^2} \quad (7)$$

$$\tau_{r\theta} = G \frac{\delta_a}{t}$$

а напруження в довільній точці клейової поверхні можна визначити за формулами:

$$\varepsilon_r = \frac{E \delta_a}{t(1 - \mu^2)} \cdot \sin \varphi$$

$$\delta_\theta = \frac{E \mu \delta_a}{t(1 - \mu^2)} \cdot \sin \varphi \quad (8)$$

$$\tau_{r\theta} = G \frac{\delta_a}{t} \cdot \cos \varphi$$

Величину δ_a визначимо з умови рівноваги колонки (6), яке запишеться у вигляді

$$\sum P_x = 0 \quad (9)$$

$$\sum P_y = 0 \quad (10)$$

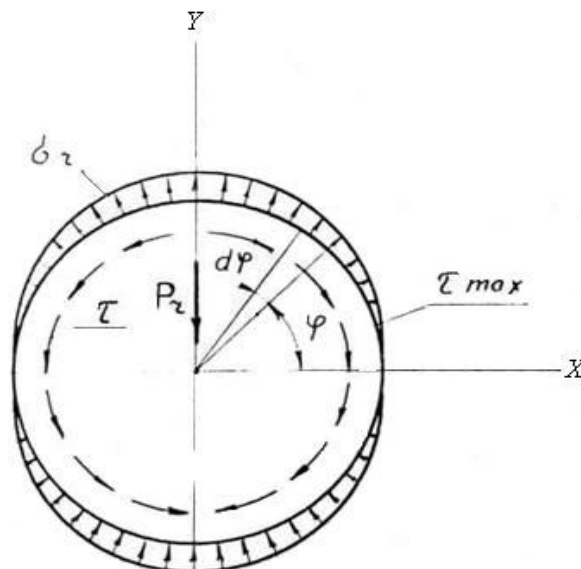


Рис. 6 – Схема навантаження направляючої колонки в місці закладення

Спроекуємо всі сили, прикладені по дузі з центральним кутом φ , на вертикальну вісь Y (рис. 7).

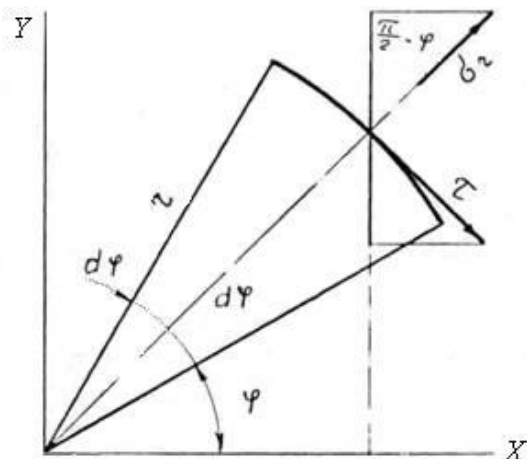


Рис. 7 – Схема розташування нормальних і дотичних напружень

З огляду на симетричності навантаження колонки щодо осі Y і з урахуванням пропозиції про рівномірності розподілу напружень в клейовому шарі по всій його висоті умова (8) задовольняється тотожно. Умова (9) в розгорнутому вигляді для розглянутого перетину записується в такий спосіб

$$\int_0^{2\pi} G_r r \sin \varphi d\varphi + \int_0^{2\pi} \tau_{r\theta} r \cos \varphi d\varphi - \frac{P_r}{B} = 0 \quad (11)$$

Підставляючи значення δ_r и $\tau_{r\theta}$ з (7) та (10) отримуємо

$$\frac{E\delta_{0r}}{t(1-\mu^2)} \int_0^{2\pi} \sin^2 \varphi d\varphi + G \frac{\delta_{0r}}{t} \int_0^{2\pi} \cos \varphi d\varphi - \frac{P_r}{B} = 0$$

Виконавши інтегрування і необхідні перетворення, знаходимо

$$\frac{E\delta_{0r}}{t(1-\mu^2)} \cdot \pi_r + G \frac{\delta_{0r}}{t} \cdot \pi_r - \frac{P_r}{B} = 0$$

Звідки

$$P_r = \pi_r \frac{\delta_0}{t} \left(G + \frac{E}{1-\mu^2} \right) \cdot B ; \quad (12)$$

$$\delta_0 = \frac{P_r t}{\pi_r \left(G + \frac{E}{1-\mu^2} \right) B} \quad (13)$$

Остаточню вираз (7) з урахуванням (12) приймає наступний вигляд

$$\delta_r = \frac{P_r \cdot \sin \varphi}{\pi_r B \left[1 - \frac{G}{E} (1-\mu^2) \right]} ;$$

$$\delta_{\theta} = \frac{P_r \mu \cdot \sin \varphi}{\pi_r B \left[1 + \frac{G}{E} (1 - \mu^2) \right]} \quad (14)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{P_r \cdot \cos \varphi}{\pi_r B \left[1 + \frac{E}{G(1 - \mu^2)} \right]}$$

Висновки

Таким чином, отримані формули дозволяють визначити максимальну величину переміщення направляючої колонки під дією горизонтального зусилля, а також провести розрахунок на міцність клейового шару в будь-якій точці поверхні, розташованій під кутом.

Якщо для матеріалу затвердівшого клею виконується умова $\sigma \leq [\sigma]$, то міцність клейового прошарку забезпечена. В іншому випадку, як впливає з системи рівнянь (14), необхідно або зменшити горизонтальну складову зусилля штампування, або збільшити діаметр направляючої колонки і висоту клейового з'єднання.

Список використаних джерел

1. Агарков В. В. Совершенствование универсально-сборных переналаживаемых штампов путем оптимизации конструктивных параметров компоновок в условиях машиностроительных производств : дис. ... канд. техн. наук / В. В. Агарков. – Харьков, 2013. – 210 с.
2. Универсально-сборные переналаживаемые штампы для листовой штамповки / Н. К. Резниченко, Г. И. Ищенко, В. В. Агарков, А. Я. Мовшович // Вісник інженерної академії України. – 2011. – Вип. 3. – С. 95–98.
3. Буденный М. М. Перспективы развития исследований и разработка новых конструкций штамповой оснастки на основе композитов / М. М. Буденный // Резание и инструмент в технологических системах : сб. науч. трудов Харьков. гос. политехн. ун-та "ХПИ". – Харьков, 2005. – Вып. 58. – С. 25–28.
4. Мовшович А. Я. Конструкции и технологические возможности специализированных переналаживаемых гибочных штампов / А. Я. Мовшович, Ю. А. Кочергин // Вестник Национального технического университета «КПИ». – Киев, 2010. – С. 250–254.
5. Мовшович А. Я. Технологические системы холоднолистовой штамповки к вопросу обоснования расчетных схем элементов разделительных штампов / А. Я. Мовшович, Н. А. Ткачук, А. Н. Ткачук // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Машиностроение и САПР : сб. науч. трудов. – Харьков, 2008. – № 14. – С. 126–141.
6. Исследование точности деталей, получаемых в переналаживаемых штампах на основе композиционных материалов / Н. В. Чижиков, А. Я. Мовшович, А. Я. Горницкий, Л. Г. Кузнецова // Вісник Національного технічного університету : зб. наук. пр. Нац. техн. ун-ту "ХПИ". Харків, 2005. – Вип. 11. – С. 25–28.
7. Денисов В. И. Повышение износостойкости направляющих элементов универсально-сборных штампов / В. И. Денисов, И. Я. Мовшович. // Технология и организация производства. – 1980. – № 1. – С. 28–30.
8. Чижиков Н. В. Аналитическая оценка надежности систем обратимых штампов / Н. В. Чижиков, М. М. Буденный // Технічний прогрес та ефективність виробництва : зб. наук. пр. Нац. техн. у-ту «ХПИ». – Харків, 2009. – Вип. 91. – С. 83–89.
9. Применение эпоксидных компаундов для закрепления направляющих элементов штампов / Г. Г. Жолткевич, В. И. Денисов, И. Я. Мовшович, А. Л. Хаатович // Технология и организация производства. – 1978. – № 4. – С. 31–34.

References

1. Agarkov, VV 2013, 'Sovershenstvovanie universalno-sbornykh perenalazhivaemykh shtampov putem optimizatsii konstruktivnykh parametrov komponovok v usloviyakh mashinostroitelnykh proizvodstv', Kand.tekh.n. thesis, Harkov.
2. Reznichenko, NK, Ishchenko, GI, Agarkov, VV & Movshovich, AYa 2011, 'Universalno-sbornye perenalazhivaemye shtampy dlja listovoj shtampovki', *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy*, iss. 3, pp. 95-98.
3. Budennyj, MM 2005, 'Perspektivy razvitija issledovanij i razrabotka novykh konstrukcij shtampovoj osnastki na osnove kompozitov', *Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah*, Harkov, iss. 58, pp. 25-28.
4. Movshovich, AJa & Kochergin, JuA 2010, 'Konstrukcii i tehnologicheskie vozmozhnosti specializirovannykh perenalazhivaemykh gibochnykh shtampov', *Vestnik Nacionalnogo tehničeskogo universiteta Kievskij politehničeskij institut*, Kiev, pp. 250-254.
5. Movshovich, AJa, Tkachuk, NA & Tkachuk, AN 2008, 'Tehnologicheskie sistemy holodnolistovoj shtampovki k voprosu obosnovanija raschetnykh shem jelementov razdelitelnykh shtampov', *Vestnik Nacionalnogo tehničeskogo universiteta Harkovskij politehničeskij institut*, Serija Mashinostroenie i Sistemy avtomatizirovannogo proektirovanija, Harkov, no. 14, pp.126-141.
6. Chizhikov, NV, Movshovich, AJa, Gornickij, AJa & Kuznecova, LG 2005, 'Issledovanie tochnosti detalej, poluchaemykh v perenalazhivaemykh shtampah na osnove kompozicionnykh materialov', *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Kharkivskiy politekhnichnyi instytut*, Kharkiv, iss.11, pp. 25-28.
7. Denisov, VI & Movshovich, IJa 1980, 'Povyshenie iznosostojkosti napravljajushchih jelementov universalno-sbornykh shtampov', *Tehnologija i organizacija proizvodstva*, no. 1, pp. 28-30.
8. Chizhikov, NV & Budennyj, MM 2009, 'Analiticheskaja ocenka nadezhnosti sistem obratimyh shtampov', *Tekhnichnyi prohres ta efektyvnist vyrobnytstva*, Natsionalnyi tekhnichnyi universytet Ukrainy Kyivskiy politekhnichnyi instytut, Kharkiv, iss. 91, pp. 83-89.
9. Zholtkevich, GG, Denisov, VI, Movshovich, IJa & Haetovich, AL 1978, 'Primenenie jepoksidnykh kompaundov dlja zakreplenija napravljajushchih jelementov shtampov', *Tehnologija i organizacija proizvodstva*, no. 4, pp. 31-34.

Стаття надійшла до редакції 17 листопада 2020 р.