

УДК 621.98

Балалаева Е.Ю.

(Приазовский государственный технический университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В КЛЕЕВОМ СОЕДИНЕНИИ КОЛЬЦЕВОГО УПРУГОГО КОМПЕНСАТОРА ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ «ПРЕСС-ШТАМП» С ЗАЩИТНЫМИ ПЛАСТИНАМИ МЕТОДОМ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

На основі теоретичного аналізу та експериментальних досліджень роботи кільцевого пружного компенсатора в умовах технологічних навантажень системи «прес-штамп» із перекосами повзуна запропонована методика розрахунку формозміни пружного елемента з урахуванням нерівномірності радіальних деформацій по висоті. Розроблені математична модель і програмне забезпечення для розрахунку дотичних напружень у клейовому шарі поліуретанового компенсатора з захисними пластинами. Отримані функціональні залежності для визначення оптимальних зон склеювання з урахуванням мінімізації дотичних напружень за методикою планування експерименту.

On the basis of new theoretical analysis and experimental investigations of the work of the ring elastic compensator with technological loads of press-die system with misalignment of the slider the method of calculation of elastic element forming adjusted for irregularity of radial deformations by height is offered. The mathematical model and soft for calculation of shearing stresses in glue layer of polyurethane compensator with protective plates are developed. The functional dependences for determination of the optimal agglutination zones adjusted for minimization of shearing stresses by the method of the design of experiments are received.

Введение

Технологические нагрузки при работе физически изношенного прессового оборудования обуславливают появление погрешностей направления ползуна и, как следствие, возникновение несоосности системы «пресс-штамп» [1], приводит к несоответствию отштампованных деталей исходным чертежам, а также повышению износа направляющих и рабочих частей штампа.

Погрешности в системе «пресс-штамп» уменьшают путем использования различных конструкций компенсирующих элементов, которые располагают между опорными поверхностями ползуна и верхней плиты штампа. Широкое распространение получили упругие компенсаторы, рассчитанные как на определённые технологические усилия [2-4], так и универсальные [5]. Основой таких компенсаторов служат пластины из полиуретана, который характеризуется сохранением стабильных характеристик жесткости на протяжении нескольких миллионов циклов нагружения, а так же элементы крепежа штампа к ползуну прессы.

Известен способ крепления верхней плиты к ползуну прессы через упругий компенсатор [6]. Однако существует угроза растрескивания упругой пластины из-за того, что при сжатии, под воздействием усилия деформирования, материал может затекать в нетехнологические отверстия, образуя области повышенной концентрации напряжений и нерегламентированных деформаций.

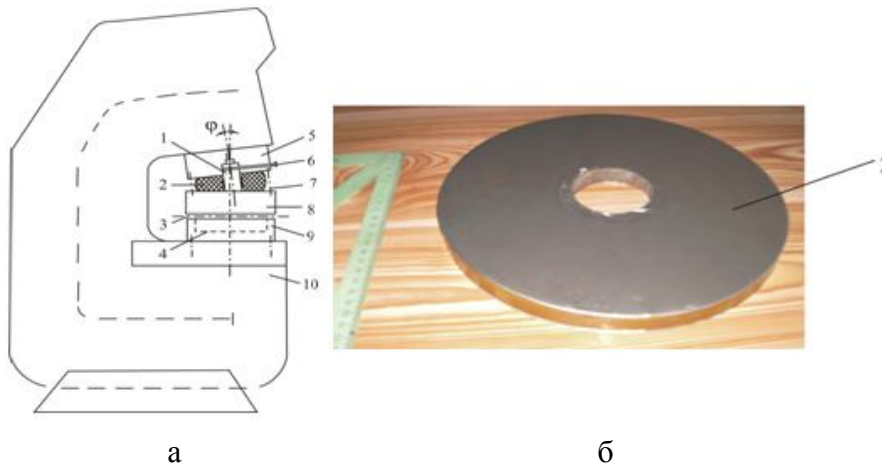
Для решения данной проблемы разработан и опробован вариант крепления верхней плиты к ползуну прессы [7], согласно которому на опорную поверхность верхней плиты штампа устанавливают кольцевой упругий компенсатор, размещенный между двумя шлифованными металлическими пластинами с центральным отверстием и соединенный с ними при помощи клеевого соединения. Недостатком данного способа является отсутствие оптимальных режимов склеивания (клей наносят на всю площадь поверхностей контакта защитных пластин и упругого элемента), которые необходимо определять исходя из конструктивно-технологических особенностей кольцевого компенсатора и физико-механических характеристик клея.

Постановка задачи

Целью настоящей работы является исследование напряжений в клеевом соединении кольцевого упругого компенсатора с защитными пластинами и получение регрессионных зависимостей по методике планирования эксперимента для определения оптимальных параметров склеивания, что позволит уменьшить затраты клея, снизить касательные напряжения в клеевом слое для улучшения условий работы полиуретанового элемента и повысить эффективность аннигиляции погрешностей направления ползуна.

Основная часть

Рассматриваемая схема крепления верхней плиты штампа к ползуну прессы, показанная на рис. 1, заключается в установке штампа на стол прессы, опускание ползуна в крайнее нижнее положение с касанием в опорную поверхность верхней плиты, регулирование межштампового пространства и закрепление верхней плиты к ползуну прессы через компенсатор в виде упругого кольца, размещенного между двумя металлическими пластинами с центральным отверстием и соединенного с пластинами при помощи клея. Причем клей наносят только на участки, где касательные напряжения, возникающие при работе компенсатора, не превышают напряжения прочности клеевого соединения.



1- хвостовик; 2 – компенсатор; 3 – линия разреза штампа; 4 – контур штампуемого изделия; 5 – ползун; 6 – фиксирующая шпилька; 7 – крепежные элементы; 8 – верхняя плита; 9 – нижняя плита; 10 – станина;
φ- угол перекоса ползуна

Рис. 1. - Схема крепления верхней плиты штампа к ползуну прессы (а) и фотография кольцевого упругого компенсатора с защитными пластинами (б)

Деформация полиуретанового кольца, показанная на рис. 2, предполагает наличие нейтральной линии течения материала, т.е. линии раздела между перемещениями полиуретана внутрь и наружу кольца. Границей течения материала является поверхность, определяемая радиусом R_k , в точках которого контактное касательное напряжение τ равно нулю. Увеличение внешнего радиуса ΔR и уменьшение внутреннего радиуса ΔR_n определяют по аналогии течения деформируемой кольцевой металлической заготовки в трех характерных точках (показаны на рис. 2 б индексами 1, 2 и 3 при обозначениях) согласно рекомендациям источника [8]. Однако в рассматриваемом случае учитывается неравномерность деформации, обусловленная перекосом ползуна на угол ϕ при определенном технологическом усилии сжатия P .

Давление сжатия p при осадке кольцевого полиуретанового компенсатора распределяется по его диаметру неравномерно, поэтому использование формулы источника [8] для его определения требует локального подхода с учетом неравномерности деформации упругого элемента по высоте.

Для учета неравномерности радиальной деформации по высоте авторами получена зависимость для определения радиуса нейтральной линии течения материала:

$$R_k = 63,25\sqrt{(R^2 R_n^2 (R^2 - R_n^2)) / (8000R^2 R_n^2 \cdot \ln(R/R_n) + 1599h^2 (R^2 - R_n^2))}, \quad (1)$$

где R – внешний радиус компенсатора;

R_n – внутренний радиус компенсатора;

h – высота компенсатора после осадки.

Касательное напряжение в клеевом слое соединения полиуретанового кольца с металлическими защитными пластинами рассчитывают согласно рекомендациям источника [9] по формуле:

$$\left. \begin{aligned} \tau\left(x, \frac{\delta_{\text{кл}}}{2}\right) &= -\vartheta_1 P_0 \frac{D}{2\delta_{\text{зп}}} \int_0^\infty \frac{(\delta \cdot \text{ch}\delta + \text{sh}\delta)}{\psi(\delta)} \cdot \left(\text{ch}\delta\varepsilon + \frac{\delta\varepsilon}{\text{sh}\delta\varepsilon}\right) I_0\left(\frac{\delta x}{\delta_{\text{зп}}}\right) I_1\left(\frac{\delta D}{2\delta_{\text{зп}}}\right) d\delta, \\ \delta &= \varepsilon\delta_{\text{зп}}, \quad \varepsilon = \delta_{\text{кл}} / 2\delta_{\text{зп}}, \quad \psi(\delta) = \vartheta_1 \left(\text{ch}\delta\varepsilon + \frac{\delta\varepsilon}{\text{sh}\delta\varepsilon}\right) (\text{sh}\delta \cdot \text{ch}\delta + \delta) + \vartheta_2 (\text{sh}^2\delta - \delta^2) \text{sh}\delta\varepsilon, \\ \vartheta_1 &= \lambda_{\text{кл}} + \mu_{\text{кл}} / \lambda_{\text{зп}} + \mu_{\text{зп}}, \quad \vartheta_2 = \mu_{\text{зп}} (\lambda_{\text{кл}} + 2\mu_{\text{кл}}) / \mu_{\text{кл}} (\lambda_{\text{зп}} + 2\mu_{\text{зп}}), \\ \lambda_{\text{кл}} &= E_{\text{кл}} \nu_{\text{кл}} / (1 + \nu_{\text{кл}})(1 - 2\nu_{\text{кл}}), \quad \lambda_{\text{зп}} = E_{\text{зп}} \nu_{\text{зп}} / (1 + \nu_{\text{зп}})(1 - 2\nu_{\text{зп}}), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где x - текущая координата;

$\delta_{\text{кл}}$ - толщина клеевого слоя;

P_0 - удельное давление;

$D = 2R_k$;

I_0, I_1 - функция Бесселя нулевого и первого порядка;

$\delta_{\text{зп}}$ - толщина защитной пластины;

ε - параметр интегрирования;

$\lambda_{\text{кл}}, \lambda_{\text{зп}}, \mu_{\text{кл}}, \mu_{\text{зп}}$ - упругие постоянные Ламе для клея и защитных пластин;

$E_{\text{кл}}, E_{\text{зп}}$ - модули упругости клея и защитных пластин;

$\nu_{\text{кл}}, \nu_{\text{зп}}$ - коэффициенты Пуассона для клея и защитных пластин.

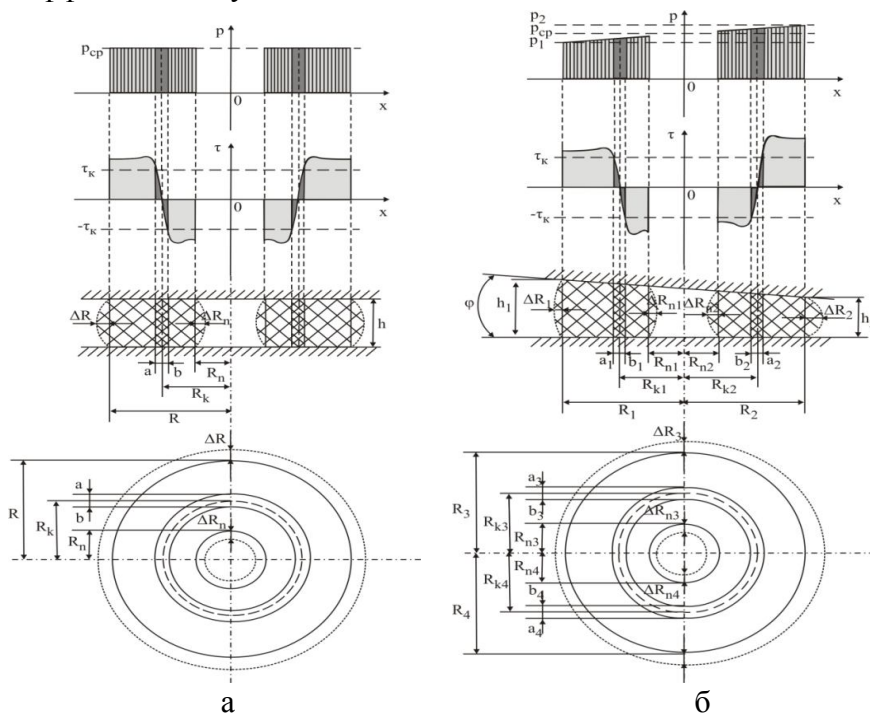


Рис. 2. - Деформация кольцевого упругого компенсатора без учета (а) и с учетом (б) неравномерности деформации по высоте

Для достижения оптимальных характеристик склеивания нанесение клея (diagum FL, diagum P, diaflex) производится только на участки, ограниченные зоной действия рабочих касательных напряжений τ со значениями, не большими, чем предельные величины τ_k . Согласно предложенной методике построен ряд эпюр касательных напряжений в зависимости от геометрических параметров компенсатора и определены зоны, для которых $\tau < \tau_k$.

Для определения участков нанесения клеевого слоя совмещали вычислительный эксперимент с методикой планирования эксперимента. Устанавливали зависимость расстояний a и b (измерение производилось от линии раздела течения R_k до внешнего и внутреннего краев компенсатора соответственно) от трех факторов: отношения толщины стенки компенсатора к его внешнему диаметру S/D (фактор x_1), отношения толщины стенки компенсатора к его начальной высоте S/H_0 (фактор x_2) и степени деформации упругого кольца ε (фактор x_3). Т. к. полиуретан сохраняет стабильные характеристики жесткости при степени осадки, не превышающей 0,3 от начальной высоты упругого элемента, то верхний уровень степени осадки $x_{3в}$ принимали равным 0,28. Нижний уровень степени осадки $x_{3н}$ определяли как максимально близкий к нулю, т. е. равным 0,068, а также рассчитывали основной уровень проведения эксперимента как $x_{3о} = (x_{3в} + x_{3н})/2 = 0,174$. По каждому опыту производилось несколько измерений расстояний a и b с учетом погрешностей (величины y_{ij}). Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в табл. 1.

Таблиця 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	S/D	S/H_0	ε
Обозначение фактора, x_i	x_1	x_2	x_3
Нижний уровень, $x_{ин}$	0,2	1	0,068
Верхний уровень, $x_{ив}$	0,4	10	0,28
Нулевой уровень, x_{io}	0,3	5,5	0,174
Интервал варьирования, Δx_i	0,1	4,5	0,106

В работе рассматривали линейную регрессионную модель с учетом парных взаимодействий. В качестве плана вычислительного эксперимента использовали двухуровневый полнофакторный эксперимент (ПФЭ) 2^3 .

В соответствии с выбранным вычислительным планом проводили вычислительный эксперимент по формулам (1)-(2), а полученные результаты использовали для вывода регрессионной зависимости.

Линейное уравнение регрессии с учетом парных взаимодействий имеет вид:

$$y = a'_0 + a'_1 x_1 + a'_2 x_2 + a'_3 z_3 + a'_4 z_1 z_2 + a'_5 z_2 z_3 + a'_6 z_1 z_3 + a'_7 z_1 z_2, \quad (3)$$

где a'_i - коэффициенты уравнения в натуральном масштабе.

В планировании эксперимента использовали кодированные значения факторов на верхнем $z_{ив}$ и нижнем $z_{ин}$ уровнях соответственно:

$$z_{ив} = (x_{ив} - x_{io})/\Delta x_i = +1, \quad z_{ин} = (x_{ин} - x_{io})/\Delta x_i = -1. \quad (4)$$

После нормирования переменных получили уравнение регрессии в кодированном масштабе:

$$y = a_0 + a_1 z_1 + a_2 z_2 + a_3 z_3 + a_4 z_1 z_2 + a_5 z_2 z_3 + a_6 z_1 z_3 + a_7 z_1 z_2 z_3, \quad (5)$$

где a_i - коэффициенты уравнения регрессии в кодированном масштабе.

План двухуровневого ПФЭ представим в кодовом масштабе матрицей планирования 2^3 (табл. 2).

Таблиця 2

Матрица планирования двухуровневого ПФЭ

№	Факторы							
	z_0	z_1	z_2	z_3	z_1z_2	z_2z_3	z_1z_3	$z_1z_2z_3$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
2	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
3	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	+1
4	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1
5	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1
6	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1
7	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Средние значения выходной переменной для каждой строки матрицы планирования вычисляли по формуле:

$$\bar{y}_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} / n, \quad (6)$$

где n – количество повторностей, N – количество факторов.

Воспроизводимость строк матрицы планирования определяли как:

$$S_i^2 = \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 / (n-1). \quad (7)$$

Для определения воспроизводимости факторов использовали критерий Кохрена:

$$G_{\text{набл}} = S_{i \max}^2 / \sum S_i^2. \quad (8)$$

Критическое значение $G_{\text{кр}}(\alpha, k, L)$ определяли по источнику [10], причем $\alpha = 0,05$, $k = n - 1$, $L = N$. Если $G_{\text{набл}} < G_{\text{кр}}$, то y_{ij} в каждой строке отличались незначительно, т. е. дисперсии считали однородными.

Коэффициенты регрессии в кодированном виде определяли как:

$$a_{i-1} = \sum_{i=1}^N \bar{y}_i \cdot z_{i-1} / N. \quad (9)$$

Для определения значимости коэффициентов рассчитывали ошибку опыта и дисперсию коэффициентов:

$$S_0^2 = \sum_{i=1}^N S_i^2 / N, \quad S_a^2 = S_0^2 / N, \quad T_{a_i} = |a_i| / S_a. \quad (10)$$

Критическое значение $T_{\text{кр}}(\alpha, k)$ определяли по источнику [10], причем $\alpha = 0,05$, $k = N(n - 1)$. Если $T_{a_i} > T_{\text{кр}}$, то соответствующий коэффициент a_i являлся значимым.

Для определения адекватности модели предварительно рассчитывали дисперсии адекватности по формуле:

$$S_{\text{ад}}^2 = n \cdot \sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - \bar{y}_i)^2 / (N - m), \quad (11)$$

где \tilde{y}_i – расчетное значение полученной функции, m – количество значимых коэффициентов.

Адекватность уравнения определяем по критерию Фишера:

$$F_{кр} = S_{ад}^2 / S_0^2. \quad (12)$$

Критическое значение $F_{кр}(\alpha, k_1, k_2)$ определяли по источнику [10], причем $\alpha = 0,05$, $k_1 = N - m$, $k_2 = N(n - 1)$. Если $F_{набл} < F_{кр}$, то полученная математическая модель являлась адекватной.

Переход к натуральным размерам факторов осуществляли на основании формулы кодирования:

$$z_i = (x_i - x_{i0}) / \Delta x_i. \quad (13)$$

В результате была получена зависимость для определения расстояний a и b от линии раздела течения R_k до внешнего и внутреннего краев компенсатора соответственно, на которые следует наносить клей для обеспечения условия $\tau < \tau_k$ [11]:

$$a = 10,283 + 0,034 \cdot S/D + 0,46 \cdot S/H_0 - 1,109 \cdot \varepsilon + 0,135 \cdot S/D \cdot S/H_0 - 0,073 \cdot S/H_0 \cdot \varepsilon - 0,034 \cdot S/D \cdot \varepsilon - 0,015 \cdot S/D \cdot S/H_0 \cdot \varepsilon; \quad b = 0,929 \cdot a. \quad (14)$$

В результате расчетов было получено, что для регрессионной модели $F_{набл} < F_{кр}$. Таким образом, гипотеза об адекватности может быть принята с 95 %-ным уровнем достоверности. Все коэффициенты полученной модели являются значимыми.

Эффективность нанесения клея только на участки поверхностей упругого компенсатора на расстояниях a и b от линии R_k состоит в минимизации напряжений, приводящих к разрушению клеевого слоя, а также позволяет снизить затраты клея путем определения оптимальных зон закрепления компенсатора в межштамповом пространстве.

На основе разработанной математической модели написано программное обеспечение в среде Borland Delphi 7, интерфейс которого показан на рис. 3, для исследования деформаций упругого элемента и определения участков склеивания кольцевого компенсатора с защитными пластинами.

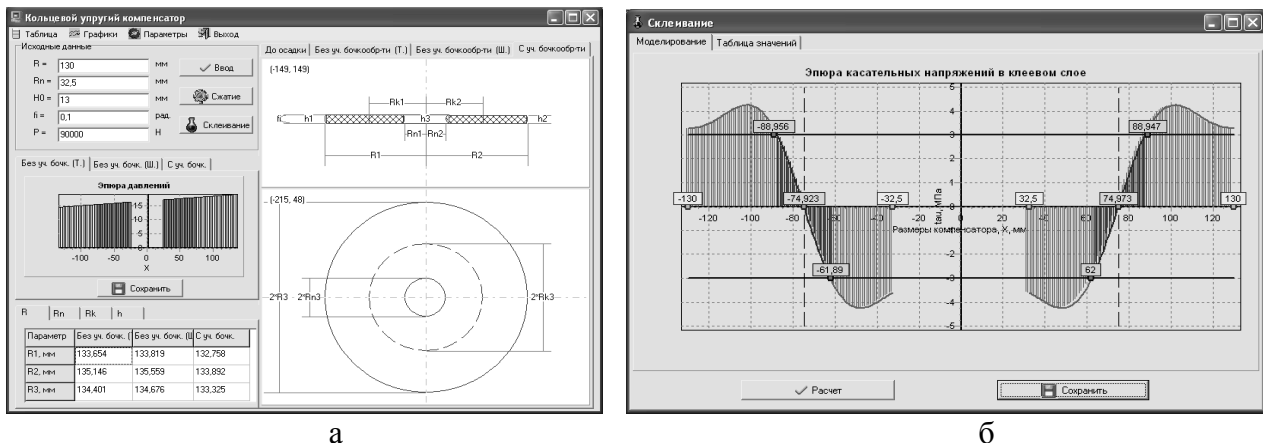


Рис. 3. - Моделирование работы кольцевого упругого компенсатора (а) и эпюра касательных напряжений в клеевом слое (б)

Проведено моделирование работы упругого кольцевого компенсатора погрешностей направления ползуна кривошипного пресса, параметры которого приняты в соответствии с описанными в источнике [7]: внешний радиус $R = 130$ мм, внутренний радиус $R_n = 32,5$ мм, $H_0 = 13$ мм, усилие сжатия $P = 0,09$ МН, угол перекоса ползуна $\varphi = 0,1$ рад. Согласно полученным результатам, клей целесообразно наносить на участки поверхности компенсатора, ограниченные расстояниями $a_1 = 14,03$ мм и $a_2 = 13,97$ мм

до внешнего края и $b_1 = 13,03$ мм и $b_2 = 12,97$ мм до внешнего края от нейтральной линии, причем $R_{k1} = 74,92$ мм и $R_{k2} = 74,97$.

Выводы

Разработана математическая модель и программное обеспечение для расчета касательных напряжений в клеевом соединении кольцевого упругого компенсатора с защитными пластинами. Путем совмещения результатов вычислений и метода планирования эксперимента получены функциональные зависимости для определения участков склеивания, для которых характерны величины напряжений, не превышающие предельных значений. В результате обеспечивается долговечная работа компенсатора, а также снижается расход клея путем снижения площади для его нанесения на зоны закрепления компенсатора в защитных пластинах в зависимости от конструктивно-технологических особенностей кольцевого компенсатора и физико-механических характеристик клея. Перспективами исследований в данном направлении являются учет влияния цикличности нагружений упругого компенсатора на прочность клеевого соединения и разработка методики расчета угловых перекосов системы «пресс-штамп».

Литература

1. Діамантопуло К.К. Компенсация несоосности системы «пресс-штамп» изношенного штамповочного оборудования / К.К. Діамантопуло, В.В. Кухарь, А.И. Евтеев // *Металлургические процессы и оборудование*. - №2. - Июнь 2005 г. - С.31-34.
2. Пат. 11782 Україна, МПК6 В 21 В 23/00. Компенсатор похибок напрямку переміщення повзуна преса / К.К. Діамантопуло, В.В. Кухар, Д.В. Єрмолов (Україна). - №и200505677; Заяв. 13.06.2005; Опубл. 16.01.2006, Бюл. № 1. - 4с., іл.
3. Діамантопуло К.К. Компенсатор погрешностей направления ползуна прессов / К.К. Діамантопуло, В.Е. Гримани // *Защита металлургических машин от поломок: Сб. научн. тр. - Вып.3. - Мариуполь, 1998.*
4. Пат. 837 Україна, МПК6 В 21 В 23/00. Компенсатор похибок / К.К. Діамантопуло, О.В. Василевський (Україна). - №2000074079; Заявл. 11.07.2000; Опубл. 14.11.2001. - Бюл.№11 - 2с., іл.
5. Пат. 38814 Україна, МПК(2006) В 30 В 15/28; В 21 В 23/00. Універсальний компенсатор похибок напрямку повзуна / В.В. Кухар, О.Ю. Балалаєва, В.С. Макєєв (Україна). - № и20086973; Заявл.20.05.2008; Опубл. 26.01.2009, Бюл.№2. - 4с., іл.
6. Пат. 37242 Україна, МПК(2006) В 30 В 15/28. Спосіб кріплення верхньої плити штампа до повзуна преса / В.В. Кухар, К.К. Діамантопуло, О.О. Лаврентік, О.Ю. Балалаєва, В.С. Макєєв (Україна). - №и200806345; Заявл.13.05.2008; Опубл. 25.11.2008, Бюл.№ 22. - 3с.
7. Діамантопуло К.К. Опыт эксплуатации кольцевого компенсатора погрешностей направления ползуна кривошипного преса / К.К. Діамантопуло, В.В.Кухарь, Е.Ю. Балалаєва, А.И. Евтеев // *Теория и практика листового проката: Сб. научн. тр. Часть 1. - Липецк: ЛГТУ, 2008. - С.176-182.*
8. Тарновский И.Я. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчета усилий и деформаций) / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго, В.Л. Колмогоров, В.Н. Трубин, Р.А. Вайсбурд, В.И. Тарновский. - М.: Металлургиздат, 1963. - 672 с.
9. Кушнарченко С.Г. Исследование напряжений в клеевом слое клееклепаных соединений / С.Г. Кушнарченко, В.А. Матвиенко, А.И. Зирка, Е.И. Поздняков // *Обработка материалов давлением в машиностроении. - Вып.17. - Харьков: Вища школа, 1979. - С.55-58.*
10. Гурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: Учебное пособие для студентов вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 1979. - 400 с., ил.
11. Висновок про видачу деклараційного патенту на корисну модель № 38322 від 07.09.09 Україна, МПК(2009) В30В 15/28. Спосіб кріплення верхньої плити штампа до повзуна преса / В.В. Кухар, О.Ю. Балалаєва, К.К. Діамантопуло, О.О. Тузенко, Д.М. Процько (Україна). - № и200906825; Заявл.30.06.2009.