

УДК 539.3

Н. Н. ТКАЧУК, Н. Б. СКРИПЧЕНКО, В. И. КОХАНОВСКИЙ, А. А. ЗАРУБИНА, И. Я. ХРАМЦОВА, А. И. ШЕЙКО, Н. Л. БЕЛОВ, А. Н. МАЛАКЕЙ, С. С. ЯЦИВ

КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАТКИ: МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

У роботі запропоновано нові моделі та методи для визначення напружено-деформованого стану прес-форм з урахуванням контактної взаємодії їхніх елементів. Умови контакту записані у вигляді нерівностей по поверхнях взаємодії деталей конструкції прес-форми. Визначені умови локального розкриття зазору між напівматрицями. Проведені дослідження напружено-деформованого стану елементів дослідної прес-форми на комп'ютерних моделях. Проведено також порівняння результатів чисельних розрахунків та даних експериментальних досліджень.

Ключові слова: контактна взаємодія, прес-форма, напружено-деформований стан, комп'ютерний аналіз, голографічна інтерферометрія.

В работе предложены новые модели и методы для определения напряженно-деформированного состояния пресс-форм с учетом контактного взаимодействия их элементов. Условия контакта записаны в виде неравенств по поверхностям взаимодействия деталей конструкции пресс-форм. Определены условия локального зазора между полуматрицами. Проведены исследования напряженно-деформированного состояния элементов исследуемой пресс-формы на компьютерных моделях. Проведено также сравнение результатов численных расчетов и данных экспериментальных исследований.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, пресс-форма, напряженно-деформированное состояние, компьютерный анализ, голографическая интерферометрия.

In this paper we propose new models and methods for stress-strain state determination of molds taking into account contact interaction of elements. Contact terms have been described as inequalities on interaction surfaces of mold details. Contact conditions were described as inequalities on the surfaces of interaction design details of molds. Stress-strain state of the mold elements were investigated with computer models. Numerical and experimental results were compared.

Keywords: contact interaction, the mold, the stress-strain state, the computer analysis, holographic interferometry.

Введение. Подвижные, неподвижные или разъемные соединения деталей машиностроительных конструкций нашли широкое распространение при изготовлении современных машин, оборудования, сооружений. При этом основную роль в обеспечении прочности, работоспособности, качества выполнения операций зачастую играет именно зона контактного взаимодействия тел качения и скольжения в подшипниках, передачи технологических усилий и движений в штампах, пресс-формах и станочных приспособлениях.

В разных случаях на первый план выдвигаются различные требования: то ли речь идет об обеспечении прочности, то ли – о точности, то ли – о жесткости. В то же время наиболее сложным с точки зрения проектного обеспечения требуемых технических характеристик является случай, когда к исследуемой конструкции выдвигается целый комплекс требований. Ярким примером таких конструкций являются элементы технологической оснастки (ЭТО). Они являются одним из элементов технологической системы (ТС): «станок – приспособление – инструмент – деталь», «пресс – штамп – формообразующие части – заготовка», «термопластавтомат – пресс-форма – полуматрицы – рабочий материал» и т. п. Оснастка, не являясь основным элементом ТС, тем не менее с точки зрения точности и качества выполнения технологических операций, переналадки на новые изделия, универсальности, экономичности производства является во многих случаях центральным ее звеном. Действительно, с одной стороны, оснастка сужает или

расширяет технологические возможности наиболее консервативной части ТС (станок, пресс, термопластавтомат). С другой стороны, она воспринимает и замыкает силовые потоки от инструмента и заготовки на технологическом оборудовании. Кроме того, она обеспечивает базирование, рабочие движения элементов ТС, а также вносит вклад в баланс упругих перемещений в технологической системе в процессе осуществления технологической операции. Т. о., к оснастке предъявляются повышенные требования по целому комплексу показателей. Это вынуждает при проектировании ЭТО проводить соответствующие исследования.

Отдельного внимания при этом заслуживает построение расчетных моделей для проведения проектных исследований. В данном аспекте возникают сложности, обусловленные наличием в исследуемых объектах контактного взаимодействия не только с другими компонентами ТС, но и элементов конструкций технологической оснастки между собой. Учитывая, что на точность обработки детали и качество ее поверхности, а также свойства изготавливаемых деталей по всему их объему влияют самые незначительные смещения при осуществлении технологического процесса, то необходимо, кроме макрогеометрических факторов (форма и размеры соединяемых деталей), учитывать и микромеханические (шероховатость, волнистость, термообработка поверхностей деталей). Более того, эти факторы следует учитывать в совокупности и во взаимодействии. Однако в настоящее время такие

комплексные модели не нашли своего достаточного развития и применения. Т. о., сформировалось достаточно острое противоречие между потребностью машиностроения, с одной стороны, и возможностями механики деформируемого твердого тела, – с другой. Это, в свою очередь, определяет актуальность возникающей проблемы – разработку новых подходов, моделей и методов исследования процессов и состояний в ЭТО при выполнении технологических операций и обеспечение на этапе проектирования необходимого уровня технических характеристик элементов технологической оснастки.

Постановка задач исследований. Целью настоящей работы является разработка моделей контактного взаимодействия элементов технологической оснастки с учетом микромеханических характеристик поверхностных слоев их контактирующих деталей. Это является центральным звеном общей масштабной, актуальной и важной проблемы, очерченной выше.

Решение поставленной задачи осуществляется на следующих этапах.

1. Разработка математической модели контактного взаимодействия элементов технологической оснастки.

2. Численная реализация предложенных моделей и методов.

3. Проведение численных исследований.

4. Сравнение полученных результатов с данными экспериментальных испытаний.

Математическая модель напряженно-деформированного состояния элементов технологической оснастки с учетом контактного взаимодействия. Полученная задача рассматривается в двух постановках. Первая из них базируется на теории вариационных неравенств [1–4] и состоит в минимизации полной внутренней энергии системы контактирующих тел

$$I(u) \rightarrow \min \quad (1)$$

на множестве ограничений

$$G = \left\{ u : (u_v^{(\alpha)}) + (u_v^{(\beta)}) \Big|_{S_c} \leq \delta^{(\alpha\beta)} \right\}, \quad (2)$$

где u – поле упругих перемещений системы контактирующих тел,

$u_v^{(\alpha)}$, $u_v^{(\beta)}$ – перемещения по нормальям к поверхностям сопряжения S_c для тел с номерами α , β и с начальным зазором $\delta^{(\alpha\beta)}$ между ними.

Вторая постановка исходит из вариационного принципа Калькера [5–7]. Он предполагает минимизацию функционала дополнительной энергии

$$\Phi(p) \rightarrow \min \quad (3)$$

на множестве ограничений

$$p \geq 0, \quad (4)$$

где p – поле контактных давлений на S_c .

При дискретизации (1), (2) с использованием метода конечных элементов получается система разрешающих соотношений [8–17]

$$x^T \cdot Kx - Fx^T \rightarrow \min, \quad (5)$$

где x – вектор узловых перемещений,

K – матрица жесткости конечно-элементного ансамбля,

F – массив узловых нагрузок.

Минимизация (5) производится на множестве узловых переменных, удовлетворяющих ограничениям (2).

Применение квадратурных формул к функционалу (3) и последующая его минимизация порождают систему соотношений [18, 19]

$$\left. \begin{aligned} \sum_m C_{nm} p_m &= \delta - h_n, n \in J; \\ c^2 \sqrt{3}/2 \cdot \sum_n p_n &= P, n \in J; \\ p_n &\geq 0, n \in J; \\ \sum_m C_{nm} p_m &\leq \delta - h_n, n \notin J; \\ p_n &= 0, n \notin J. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где p_n – узловые значения искомого контактного давления на сеткетриангуляции с шагом c ,

δ – общее сближение контактирующих тел,

h – начальный зазор между ними,

P – усилие прижатия,

J – множество узлов, принадлежащих области контакта в актуальном состоянии;

C_{nm} – коэффициенты матрицы влияния, определяющей перемещение в каждом узле дискретизации при приложении единичной базисной функции в разложении искомого контактного давления, соответствующей m -му узлу.

И в соотношениях (5), и – в (6) возможен учет в качестве контактирующих деталей не только гладких, но и шероховатых тел. Шероховатость порождается в ходе той или иной механической и термообработки поверхности детали из определенного материала. В первом приближении [20] для ее учета можно использовать соотношения для винклеровского слоя [21]:

$$u_v^{(\gamma)} = \lambda^{(\gamma)} \cdot p, \text{ или } p = \kappa^{(\gamma)} \cdot u_v, \quad (7)$$

где $u_v^{(\gamma)}$ – нормальные перемещения за счет обжатия винклеровского слоя с номером γ ,

$\lambda^{(\gamma)}$, $\kappa^{(\gamma)}$ – соответственно характеристики контактной податливости и жесткости ($\kappa\lambda = 1$) винклеровского слоя.

Т. о., для решения возникающей задачи можно использовать и метод конечных элементов [22], и метод граничных элементов (например, в варианте, предложенном в [18,19]). Данные методы и были использованы для получения результатов, описанных далее в работе.

Исследуемые объекты. Рассмотрим, следуя работам [23, 24], напряженно-деформированное состояние элементов пресс-форм с учетом их контактного взаимодействия.

Пресс-формы являются сложными многокомпонентными конструкциями, при проектировании, исследовании и изготовлении которых широко применяются различные CAD/CAM/CAE – системы. В то же время использование универсальных CAD/CAM/CAE – систем затеняет качественный анализ влияния тех или иных факторов на напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов пресс-форм. Такие знания очень ценны с точки зрения формирования банка данных о свойствах элементов пресс-форм, являющихся ответственными и нагруженными деталями. Действительно, назначение пресс-форм – формирование деталей из пластиков, сплавов и легкоплавких металлов. При этом в процессе изготовления деталей на элементы конструкции пресс-форм действуют высокие механические нагрузки от давления рабочей жидкости в формирующих полостях и от усилий смыкания пресс-формы за счет усилия закрытия от подвижной плиты термопластавтомата, на котором данная пресс-форма установлена. Это – фактор нагруженности. Фактор ответственности состоит в том, что формируемая в пресс-форме деталь обретает свою окончательную форму в полостях полуматриц пресс-форм, находящихся в центре многокомпонентной структуры типа «сэндвич». Все элементы этой структуры подвергаются механическому воздействию, причем как извне, так и изнутри (см. выше). Соответственно, недостаточно обеспечить номинальную форму рабочей полости только в ненагруженном состоянии (например, за счет высокой точности изготовления сопрягаемых элементов пресс-форм и качества обработки их поверхностей). Важно обеспечить сохранение заданной формы и размеров также и в нагруженном состоянии (например, за счет нераскрытия стыка в сопряжении полуматриц пресс-формы).

Т. о., при обеспечении прочности элементов пресс-форм и требуемого качества выполняемой или технологической операции важны многие факторы. Для исследования их влияния на прочностные и жесткостные свойства пресс-форм разработаны несколько специализированных подсистем (структура – на рис. 1), ориентированных на исследование такого типа конструкций. Эти подсистемы и результаты, полученные с их применением, описаны далее в работе.



Рис. 1 – Подсистемы комплексной “САПР-ПФ”

Подсистема оперативного анализа жесткости полуматриц пресс-форм. Рассмотрим, следуя работе [24], структуру и результаты исследований с использованием разработанной подсистемы оперативного анализа напряженно-деформированного состояния элементов пресс-форм с учетом их контактного взаимодействия (рис. 2).

Наиболее ответственными элементами пресс-форм являются полуматрицы, в формирующих полостях которых происходит формообразование изделий. Рабочий материал под высоким давлением подается в полость полуматриц. Происходит их деформация. На первых этапах проектирования возникает проблема выбора конструктивных решений, которые обеспечивают нераскрытие стыков в сопряжении полуматриц. Для решения этой задачи создана система оперативного многовариантного анализа НДС полуматриц пресс-форм.

Расчетные схемы полуматриц пресс-форм. Расчетные схемы полуматриц пресс-форм строятся на основе анализа взаимодействия элементов пресс-формы (рис. 3). Полуматрица 8 закреплена на жестком основании (плиты 4, 2) и испытывает по сравнению с полуматрицей 7 значительно меньшие деформации, следствием чего в дальнейшем при оперативном многовариантном анализе напряженно-деформированного состояния элементов пресс-форм рассматривается напряженно-деформированное состояние только полуматрицы 7. Последняя может закрепляться на подкладной плите различными способами.

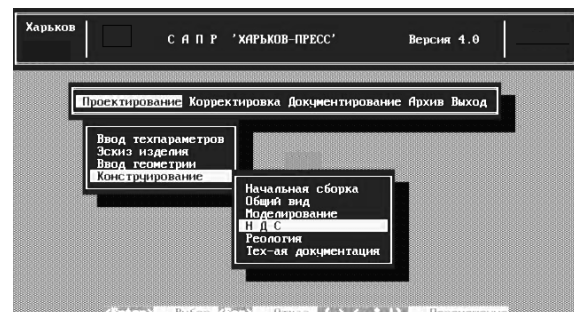


Рис. 2 – Подсистема исследования напряженно-деформированного состояния элементов пресс-форм

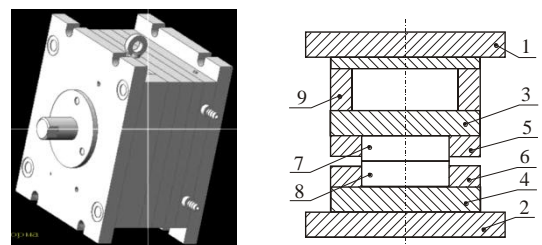


Рис. 3 – Схема взаимодействия элементов пресс-формы:
1 – подвижная плита литейной машины; 2 – не-подвижная плита литейной машины; 3 – подкладная плита; 4 – плита; 5, 6 – обойма; 7, 8 – полуматрицы; 9 – опоры

Варианты трех схем закрепления полуматрицы 7 на плите 3 показаны на рис. 4:

- вариант 1 соответствует свободному опиранию полуматрицы 7, зафиксированной обоймой 5, на подкладной плите 3 (см. рис. 3);
- вариант 2 соответствует закреплению полуматрицы при помощи наклонных винтов, расположенных в обойме (по два с каждой стороны) и создающих усилия прижима полуматрицы к плите и усилия ее обжатия;
- вариант 3 соответствует закреплению полуматрицы при помощи обоймы 5, выполненной в виде прижимных планок.

На полуматрицу со стороны подкладной плиты действует равномерно распределенное давление q , внутренняя ее часть находится под действием давления p рабочего тела. По плоскости $z = \gamma_1$ (рис. 5) исследуемая полуматрица взаимодействует с полуматрицей, размещенной на неподвижной жесткой плите. В силу отмеченных особенностей деформирования последней граничные условия на плоскости сопряжения полуматриц имеют вид:

$$u_z \leq 0, \quad (8)$$

где u_z – перемещения точек полуматрицы в направлении оси z . Данное выражение определяет условие непроникновения подвижной полуматрицы в неподвижную.

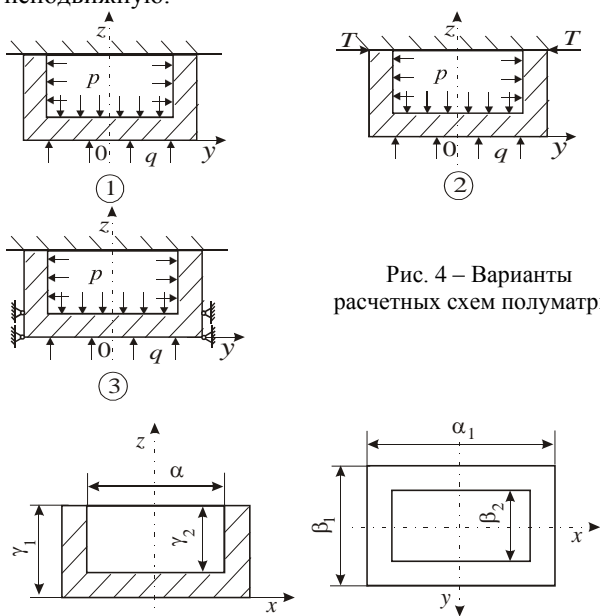


Рис. 4 – Варианты расчетных схем полуматриц

Рис. 5 – Основные конструктивные параметры полуматриц

Указанные нагрузки и граничное условие (1) определяют вариант 1 расчетной схемы полуматрицы. Вариант 2 отличается от варианта 1 приложением обжимающих нагрузок T (по два усилия с каждой стороны). Вариант 3 отличается от варианта 1 наличием ограничений на перемещения закрепленных прижимными планками точек полуматрицы в плоскости Oxy (см. рис. 4). Таким образом, для определения напряженно-деформированного

состояния полуматриц пресс-форм необходимо решить пространственную контактную задачу теории упругости.

Для дискретизации задачи привлечен метод конечных элементов с конечными элементами в форме параллелепипеда. Предложенный алгоритм реализован в виде комплекса программ и использован при решении ряда задач об определении напряженно-деформированного состояния элементов переналаживаемой технологической оснастки [25,26].

Анализ расчетных схем позволяет выделить следующие основные параметры, определяющие прочностные и жесткостные характеристики полуматриц пресс-форм: схема закрепления полуматрицы на подкладной плите; величина обжимаемых усилий (схема 2 закрепления полуматрицы), а в качестве основных задач исследований – определение их влияния на прочность и жесткость полуматриц.

Методика и результаты исследований напряженно-деформированного состояния полуматриц пресс-форм. Предлагается следующий вариант, реализующий предложенную в работе схему расчетно-экспериментальных исследований элементов механических систем и предполагающий следующие этапы.

1. Создание пробной расчетной модель объекта (модель первого уровня) с использованием специализированной или универсальной системы автоматизированного проектирования (см. рис. 1, 2).
2. Проведение численного исследования объекта.
3. Проведение экспериментального исследования объекта. Сравнение результатов численных и экспериментальных исследований и определение значимых факторов модели.
4. Корректировка структуры и параметров расчетных моделей объекта (модель второго уровня).
5. Проведение повторного численного исследования объекта.
6. Корректировка расчетной модели третьего уровня.
7. Проведение численных исследований объекта с различным набором конструктивных и эксплуатационных параметров. Расчет значений параметров, обеспечивающие необходимый уровень прочности и жесткости.
8. Корректировка исходной модели в САПР.
9. Создание конечно-элементных моделей и подсистемы для углубленного анализа напряженно-деформированного состояния пресс-формы как системы взаимодействующих элементов.

Разработанные математические модели и программный комплекс были использованы в процессе многовариантных исследований опытных образцов пресс-форм. Исследовалось влияние конструктивных и технологических факторов на напряженно-деформированное состояние полуматриц пресс-форм. В процессе исследований напряженно-деформированного состояния полуматриц пресс-форм использовались следующие значения их основных конструктивных параметров (см. рис. 5): $\alpha_1 = 240$ мм, $\alpha_2 = 160$ мм, $\beta_1 = 480$ мм, $\beta_2 = 400$ мм, $\gamma_1 = 60$ мм, γ_2

= 20 мм, модуль упругости материала полуматрицы $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,28$. Примеры конечно-элементных моделей полуматриц приведены на рис. 6.

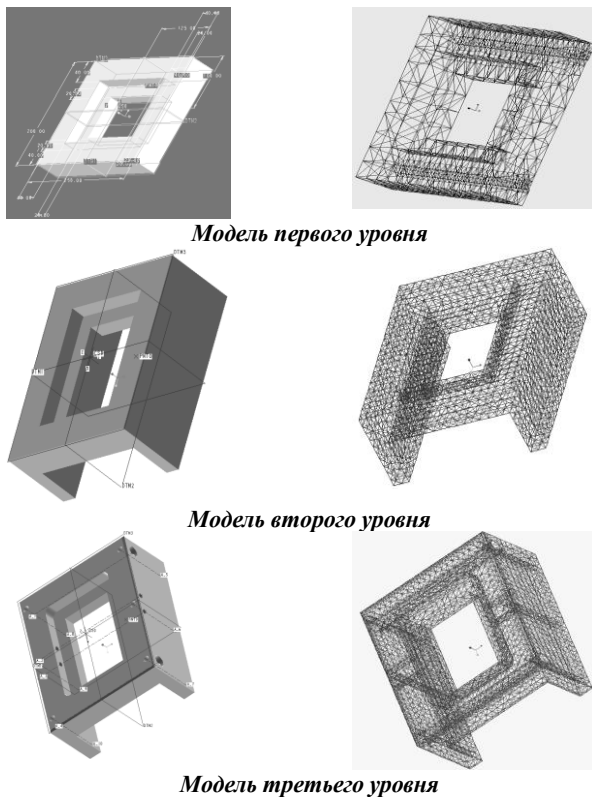


Рис. 6 – Примеры и фрагменты конечно-элементных моделей пресс-форм, построенные с использованием специализированной системы автоматизированного проектирования САПР-ПФ и системы Pro/ENGINEER

Усилие закрытия пресс-формы принималось равным 1,0 МН, давление рабочего тела $p = 100$ МПа. Усилие обжатия полуматрицы пресс-формы T принималось равным 20, 40, 60, 80 кН. Расположение характерных точек полуматрицы пресс-формы показано на рис. 7.

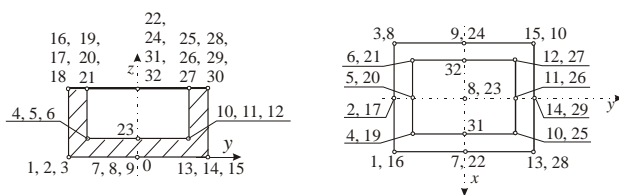


Рис. 7 – Характерные точки полуматрицы

Результаты исследований. На рис. 8, 9 приведены характерные точки полуматрицы и схемы деформирования различных сечений полуматрицы (вариант 1 расчетной схемы). Видно, что максимальный прогиб наблюдается в центральной части полуматрицы (124 мкм). Периферийные точки полуматрицы смещены в направлении плоскости сопряжения с другой полуматрицей пресс-формы (см. рис. 8, 9). Происходит распирание боковых граней

полуматриц, причем максимальные перемещения u_x, u_y достигаются в сечениях $y = 0$ мм и $x = 0$ мм (93 мкм и 105 мкм соответственно).

На рис. 10 представлены схемы деформирования сечения $y = 0$ мм при различных граничных условиях. Здесь схема *a* соответствует варианту 3 граничных условий, *б* - варианту 2 при $T = 20$ кН, *в* - варианту 2 при $T = 80$ кН. Видно, что данные схемы качественно и количественно соответствуют схеме деформирования сечения $y = 0$ мм полуматрицы при 1-м варианте граничных условий. Небольшое отличие картин деформирования наблюдается только в зоне сопряжения дна и боковых стенок полуматрицы. Количественные характеристики деформированного состояния пресс-форм представлены в табл.2. Здесь Δ_1 – максимальный прогиб дна полуматрицы, Δ_2 – максимальное раскрытие стыка по внутреннему контуру зоны сопряжения полуматриц, Δ_3 – максимальное раскрытие стыка по внешнему контуру зоны сопряжения полуматриц, Δ_4 – максимальное распирание боковой поверхности полуматриц.

В табл. 1 приведены также параметры напряженно-деформированного состояния полуматрицы высотой 40 мм (параметры $\gamma_1 = 40$ мм, $\gamma_2 = 20$ мм) с вариантом нагружения 1.

Из представленных в табл. 1 и на рис. 8–10 данных видно, что характер деформирования полуматриц пресс-форм ($\gamma_1 = 60$ мм) практически не зависит от варианта расчетной схемы и величины усилий обжатия. Происходит изгиб дна и распирание боковых граней полуматриц. Максимальный прогиб в центральной части – 124–134 мкм для различных вариантов расчетных схем. Влияние усилий обжатия полуматриц сказывается только непосредственно в зоне их приложения. По контуру плоскости разреза полуматриц раскрытая стыка не происходит.

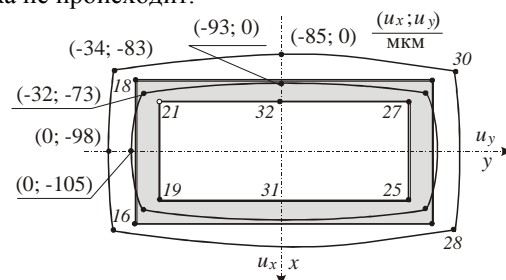


Рис. 8 – Схема деформирования полуматрицы в плоскости $z = \gamma_1$ при 1-м варианте граничных условий

Несколько иная картина деформирования полуматрицы с $\gamma_1 = 40$ мм. Здесь наблюдается раскрытие плоскости разреза по внутреннему контуру на 93 мкм. Максимальный прогиб дна – 285 мкм.

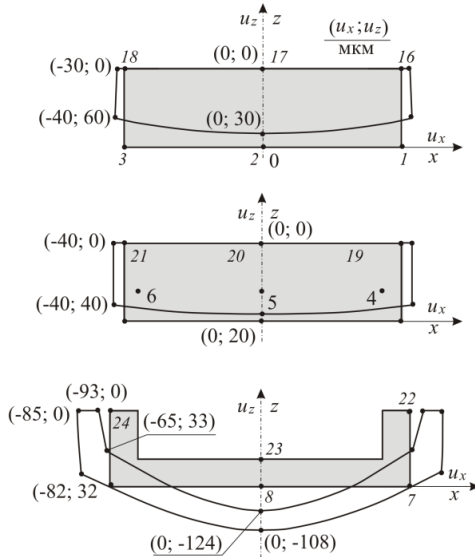


Рис. 9. Схема деформирования сечений полуматрицы при 1-м варианте граничных условий

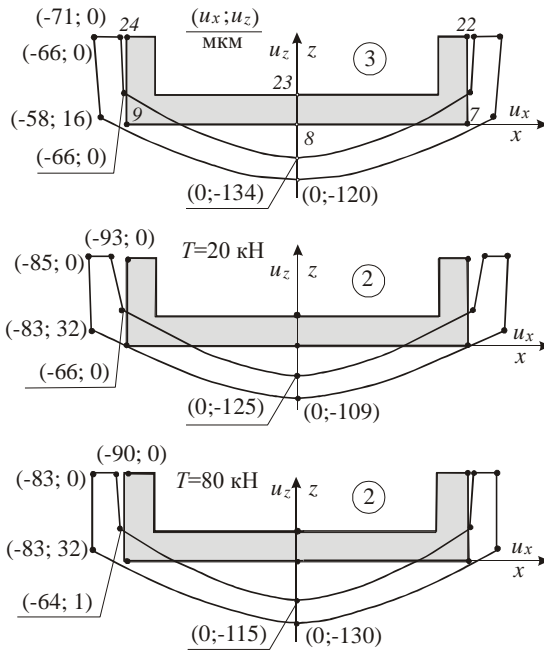


Рис. 10. Схема деформирования сечений полуматрицы при различных вариантах граничных условий

Таблица 1 – Параметры деформированного состояния исследуемых полуматриц, мкм

Варианты расчетной схемы	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4
2 $T=20$ кН	125	0	0	98
2 $T=40$ кН	127	0	0	92
2 $T=60$ кН	128	0	0	91
2 $T=80$ кН	130	0	0	90
3	134	0	0	98
1 $\gamma_1=40$ мм	285	93	0	52
1	124	0	0	105

Таблица 2 – Геометрические характеристики полуматриц пресс-форм, мм

Пресс-форма	α_1	α_2	β_1	β_2	γ_1	γ_2	Граничные условия	T , кН
МДВ 0600.4003	360	280	280	200	60	20	1	-
	360	280	280	200	60	20	2	12
	360	280	280	120	60	20	2	12
	360	280	280	40	60	20	2	12
	360	280	280	200	60	20	2	6
	360	280	280	200	60	20	2	24
	360	280	280	200	60	20	2	36
	360	280	280	200	60	20	3	-
МДВ 0600.4004	440	360	240	160	60	20	2	12
МДВ 0600.4004 двухместная, $\alpha_2=40$ мм	440	360	240	160	60	20	2	12

Таким образом, увеличение высоты полуматрицы с 40 до 60 мм привело к уменьшению прогиба и устранению раскрытия стыка по периферии плоскости разреза полуматриц пресс-форм.

Анализ результатов, полученных при исследовании напряженно-деформированного состояния модельных полуматриц пресс-форм ($\gamma_1=60$ мм) позволяет сделать следующие выводы:

- величина и характер деформирования полуматриц пресс-форм практически одинаковы для различных вариантов их крепления на подкладной плите;
- раскрытия стыка по периферии плоскости сопряжения полуматриц пресс-форм не происходит;
- увеличение высоты полуматрицы с 40 мм до 60 мм приводит к уменьшению прогиба ее дна примерно в 2,0-2,3 раза.

Предложенная система оперативного анализа прочностных и жесткостных характеристик полуматриц пресс-форм позволяет на основе многовариантных расчетов проводить обоснованный выбор конструктивных схем и рациональных параметров, обеспечивающих нераскрытие стыка в сопряжении полуматриц. Это позволяет обеспечивать высокое качество и точность изготовления деталей.

Обоснованность расчетных схем, принятых при оперативном анализе напряженно-деформированного состояния элементов пресс-форм, подтверждаются результатами экспериментальных исследований. Работоспособность разработанной системы оперативного анализа прочности, жесткости и точности изготовления подтверждена в процессе выполненных исследований модельных объектов. На основе комплекса рекомендаций спроектирован ряд пресс-форм для изготовления конкретных изделий. Данные пресс-формы в процессе изготовления

деталей подтвердили высокие эксплуатационные качества.

Исследование прочностных и жесткостных характеристик полуматриц реальных пресс-форм. С использованием разработанного программного обеспечения проведен расчет напряженно-деформированного состояния полуматриц пресс-форм МДВ 0600.4003.000 и МДВ 0600.4004.000 (Харьковский НИИ технологии машиностроения). В расчетах полагалось: усилие закрытия пресс-форм $Q = 2,5$ МН; давление впрыска расплавленной пластмассы $p = 30$ МПа; усилие обжатия $T = 12$ кН; модуль упругости материала полуматрицы $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,28$.

Значения геометрических параметров, виды граничных условий для различных вариантов расчетных схем полуматриц сведены в табл. 2. На примере пресс-форм МДВ 0600.4003 проведено исследование влияния вида граничных условий и габаритов изготавливаемой детали, а также усилий обжатия на напряженно-деформированное состояние полуматрицы. При расчетах пресс-форм МДВ 0600.4004 определилось влияние промежуточного ребра перегородки между стенками на жесткостные характеристики полуматрицы (на рис. 11 приведена схема двухместной матрицы, отличие расчетной схемы которой от расчетной схемы одноместной заключается в наличии ребра, разделяющего формы для литья деталей).

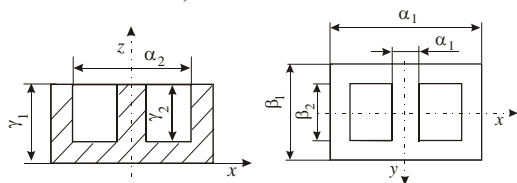


Рис. 11 – Основные конструктивные параметры двухместной полуматрицы

На рис. 12 приведена схема деформирования сечений полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4003 (вариант 2 табл. 2). Видно, что максимальный прогиб полуматрицы достигается в средней части (63 мкм). Периферийные точки полуматрицы смещаются в направлении плоскости разреза полуматриц. В сечении $x = 0$ мм по внутреннему контуру сопряжения полуматриц происходит раскрытие стыка на 5 мкм. Раскрытие стыка по внешнему контуру сопряжения не наблюдается.

На рис. 13 представлены схемы деформирования сечений $x = 0$ мм полуматриц пресс-формы МДВ 0600.4003 с различной толщиной стенки $t = (\alpha_1 - \alpha_2) / 2$. Видно, что уменьшение габаритных размеров изготавливаемой детали (увеличение толщины стенки полуматрицы пресс-формы) приводит к изменению характера деформирования полуматрицы: прогибы ее центральной части сначала уменьшаются, а затем меняют знак.

На рис. 14 приведены схемы деформирования сечений $x = 0$ мм полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4003 при варьировании усилия их обжатия

системой наклонных винтов T . Номинальное усилие $T = 12$ кН. Как следует из представленных рисунков, картина деформированного состояния полуматрицы незначительно меняется при приложении усилий обжатия.

Анализ полученных картин деформированного состояния полуматрицы позволяет выделить параметры $\Delta_1 \div \Delta_4$, характеризующие их жесткость и аналогичные по смыслу приведенным в табл. 1. В табл. 3 сведены значения параметров $\Delta_1 \div \Delta_4$ для всех вариантов расчетных схем, указанных в табл. 2 (за исключением варианта 10).

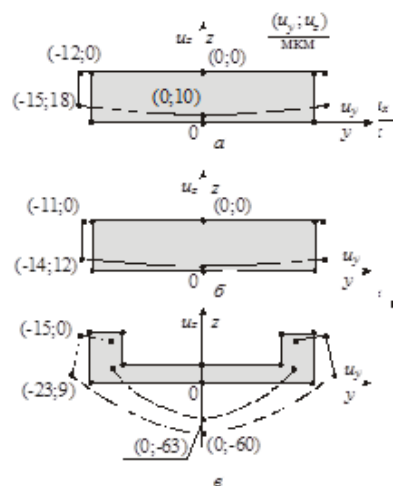


Рис. 12 – Схема деформирования сечений полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4003 (вариант 2 табл. 2): а – $x = -180$ мм; б – $x = -140$ мм; е – $x = 0$ мм

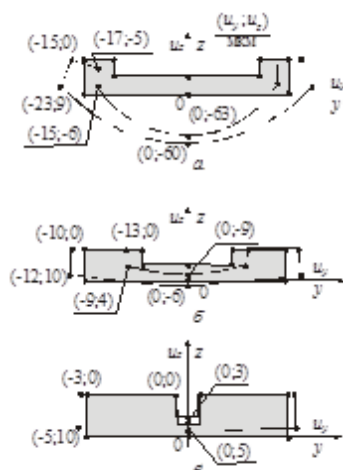


Рис. 13 – Схема деформирования сечений $x = 0$ мм полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4003 с различной толщиной стенки: а – $t = 40$ мм; б – $t = 80$ мм; е – $t = 120$ мм

Уменьшение габаритов изготавливаемой детали резко снижает прогибы днища (с 64 мкм до 3÷9 мкм), величину распираия боковых стенок (с 25 мкм до 6÷13 мкм), а также приводит к отсутствию раскрытия стыка по всей плоскости сопряжения полуматриц.

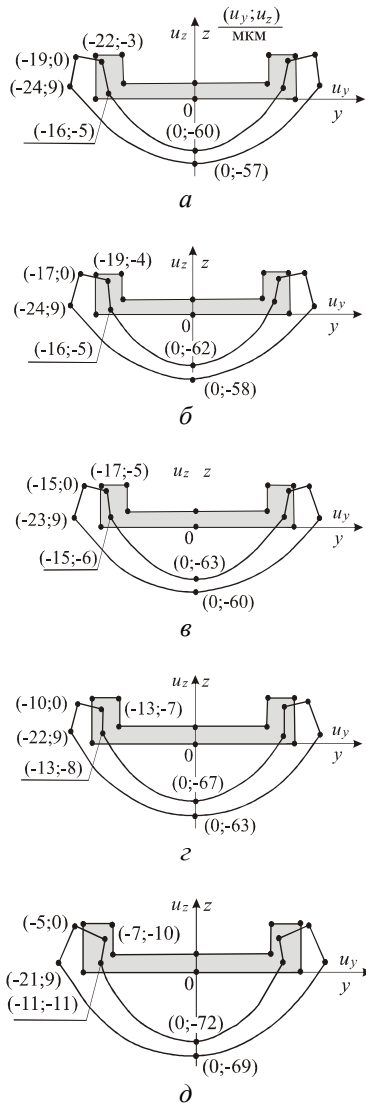


Рис. 14 – Схема деформирования сечений $x=0$ мм полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4003 при варьировании усилия обжатия: а – $T=0$ кН; б – $T=6$ кН; в – $T=12$ кН; г – $T=24$ кН; д – $T=36$ кН

Таблица 3 – Параметры деформированного состояния полуматриц пресс-форм, мкм

Пресс-форма	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4
МДВ 0600.4003	61	3	0	27
	64	5	0	25
	9	0	0	13
	3	0	0	6
	62	4	0	26
	67	7	0	24
	72	10	0	23
	60	0	0	27
МДВ 0600.4004	57	0	0	25

На рис. 15 приведена схема деформирования сечений $x=0$ мм полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4004 (двухместный и одноместный варианты). Видно, что наличие разделяющей перегородки

существенно изменяет характер и наличие прогиба днища. В одноместной полуматрице прогиб днища имеет выраженный максимум в центральной части. В двухместной полуматрице максимумы прогибов наблюдаются в зоне центральных частей формирующих полостей. Максимальный прогиб днища одноместной полуматрицы составляет 57 мкм, двухместной – 20 мкм.

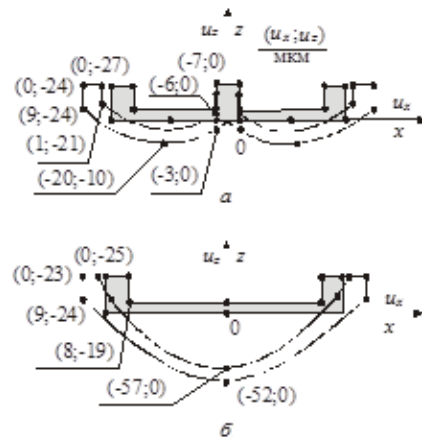


Рис. 15 – Схема деформирования сечений $x=0$ мм полуматрицы пресс-формы МДВ 0600.4004 (двухместный и одноместный варианты)

Для напряженного состояния полуматриц пресс-форм характерно преобладание осевых напряжений. Так, в полуматрице пресс-форм (см. табл. 3, вариант 1 расчетной схемы) максимальные осевые напряжения имеют величины: $\sigma_x = 94$ МПа, $\sigma_y = 74$ МПа, $\sigma_z = 73$ МПа; касательные – $\tau_{xy} = 22$ МПа, $\tau_{yz} = 45$ МПа, $\tau_{zx} = 38$ МПа, а эквивалентные $\sigma_s = 121$ МПа.

Таким образом, напряжения в полуматрицах имеют невысокий уровень по сравнению с допускаемыми для большинства инструментальных сталей, применяемых для их изготовления (X12M, У8А, У10А и др.), величины которых составляют не менее 250 МПа. В связи с этим требование прочности полуматриц заведомо удовлетворяется, и уровень напряжений не является определяющим для исследованных конструкций.

Анализ описанных выше исследований позволяет выделить следующие характерные особенности их напряженно-деформированного состояния.

1. Величина перемещений и характер деформирования исследованных полуматриц практически одинаковы для различных вариантов их крепления на подкладной плите.

2. Для напряженного состояния полуматриц характерен относительно невысокий уровень напряжений по сравнению с допускаемыми, в связи с чем критерий прочности не является определяющим для гаммы исследованных полуматриц.

3. Усилия обжатия полуматриц до трехкратной (по сравнению с номинальной) величины приводят к незначительному (до 10%) уменьшению распухания

боковых стенок, увеличению примерно на 20% прогибов центральной части днища и росту в 3 раза раскрытия стыка по внутреннему контуру плоскости сопряжения полуматриц.

4. Уменьшение габаритов формующей полости в полуматрице от уровня $(5/7 \div 7/9)$ до $(1/7 \div 1/3)$ габаритных размеров полуматрицы в плане приводит к уменьшению в 21 раз прогибов в центральной части, снижению в 4 раза распираания боковых стенок и устранению раскрытия стыка по всей плоскости сопряжения полуматриц.

5. Наличие в полуматрице перегородки между формующими полостями приводит к изменению характера ее деформирования и существенному уменьшению прогибов днища. Так, прогиб днища полуматрицы пресс-форм МДВ 0600.4004 (двухместный вариант) в 2,5 раза меньше, чем для одноместного варианта.

6. Раскрытие стыка по периферии плоскости сопряжения полуматриц исследованных пресс-форм не происходит.

Подсистема анализа рабочих процессов при осуществлении технологических процессов в реальных пресс-формах.

Кроме того, для анализа напряженно-деформированного состояния элементов пресс-форм с учетом их контактного взаимодействия была разработана подсистема, ориентированная не на модельные, а на реальные пресс-формы. При этом отличительной особенностью созданной подсистемы является ее приспособленность к анализу не только конечных состояний исследуемых объектов, но и к изучению эволюции их состояний при варьировании проектно-технологических параметров, с одной стороны, а также эксплуатационных усилий, – с другой. Кроме того, созданная система автоматизированного анализа и синтеза пресс-форм «СААС – ПФ» может быть интегрирована с другими подсистемами САПР или универсальными САД-системами.

На основе комплекса проведенных ранее [24] численных и экспериментальных исследований элементов пресс-форм, возможно выявление значимых факторов пресс-форм с точки зрения определения их прочностных, жесткостных и точностных характеристик, в связи с чем появилась возможность создания качественно новой системы автоматизированного анализа напряженно-деформированного состояния и синтеза рациональных конструктивных и технологических параметров «СААС-ПФ». Данная система является основой создания полноценной комплексной системы моделирования конструкций и физико-механических процессов в пресс-формах. Для нее *характерны*:

- соединение преимуществ специализированной и универсальных САД/САМ/САЕ-систем;
- использование обобщенного

параметрического подхода как основы для описания геометрии, физико-механических процессов и параметров численных моделей;

- расчетно-экспериментальное обоснование используемых количественных и качественных параметров численных моделей элементов пресс-форм;

- полнофункциональность как с точки зрения полноты охвата конструктивных элементов, так и условий их контактного взаимодействия;

- комплексность подхода, который позволяет исследовать и силовое воздействие от литейной машины, и давление рабочего материала в формующих полостях, а также учитывать тепловое воздействие данного материала и системы охлаждения.

Разработанная «СААС-ПФ» является основой для создания отечественной комплексной системы автоматизированного проектирования, исследования и технологической подготовки производства, отличительными характеристиками которой являются:

- широкие возможности моделирования;
- встроенная база данных и знаний;
- учет специфики конструкций, сортамента и свойств используемых материалов;
- учет технологического оборудования и оснастки предприятий отечественного машиностроения.

На рис. 16 и в табл. 5, 6 представлены иллюстрации отдельных этапов моделирования и исследования пресс-форм с использованием «СААС-ПФ».

Анализ представленных параметров дает возможность провести более глубокий анализ протекающих в пресс-формах процессов и реализуемых состояний. В частности, как видно из картин и графиков, собранных в табл. 5, на зависимостях перемещений характерных точек от условного параметра TIME (определяет порядок приложения и величины прикладываемых нагрузок) резко выделяются несколько участков. Участки I, II соответствуют усилиям обжатия наклонными винтами и усилий смыкания. При этом сопряженные точки обеих полуматриц перемещаются согласованно. На этапе III (постепенное нарастание давления впрыскиваемого материала в полости полуматриц) происходит незначительное рассогласование перемещений сопряженных точек полуматриц вплоть до перехода на участок IV. На этом участке начинается процесс резкого нарастания зазора между полуматрицами, т.е. происходит локальное раскрытие стыка. При этом наличие и размеры промежуточной опоры под подвижной полуматрицей пресс-форм положительно сказываются на продлении состояния нераскрытия стыка в сопряжении полуматриц пресс-форм.

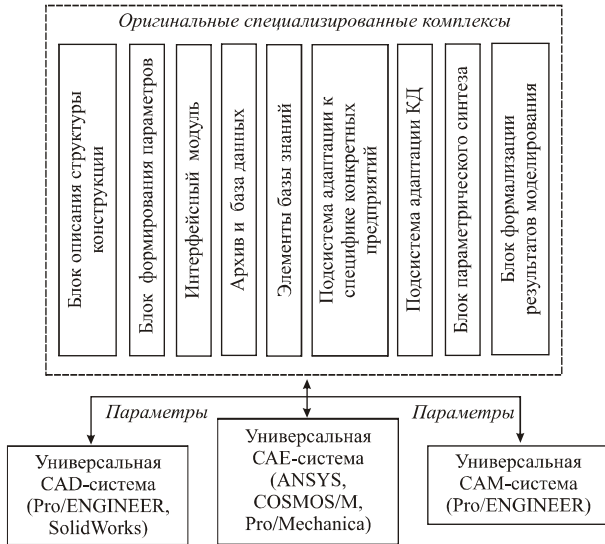


Рис. 16 – Структура “СААС-ПФ”

Таблица 5 – Этапы исследования напряженно-деформированного состояния элементов пресс-форм

Картина распределения осевых перемещений	Зависимость перемещений точек в сопряжении полуматриц в процессе нагружения усилиями закрытия пресс-формы, обжатия винтами и давления впрыска рабочего тела

Таблица 6 – Этапы моделирования элементов пресс-форм

	Название этапа	
	Параметрические геометрические модели	Параметрические конечно-элементные модели
Получаемые после выполнения этапа результаты исследований		

Установленные особенности дают основание для следующих заключений:

1. Стремление обеспечить прочностные характеристики пресс-форм не всегда решает проблему достижения качества выполнения технологических операций, поскольку не всегда удовлетворяются требования по жесткостным характеристикам.
2. Во многих случаях усилие закрытия пресс-формы заведомо выше усилия расширения из-за давления рабочего материала в формующей полости полуматриц. Однако это не гарантирует от локального раскрытия стыка по отдельным зонам плоскости разреза пресс-формы. Т. о., условие отсутствия локального раскрытия по плоскости сопряжения подвижной и неподвижной частей пресс-форм является одним из важных критериев при их проектировании.
3. Локальное раскрытие стыка между полуматрицами служит источником не только брака при изготовлении деталей (изменение толщины, размеров или появления на них облоя), но также может привести к запуску прогрессирующего процесса вплоть до прорыва рабочего материала из формующей полости пресс-форм.

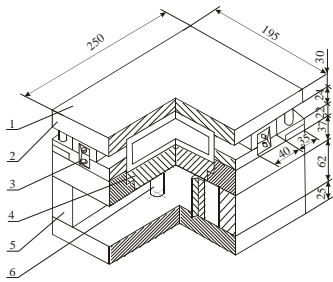


Рис. 17 – Конструкция блока пресс-форм: 1 – матрица; 2 – верхняя плита; 3 – винты для закрепления формирующей вставки; 4 – подкладная плита; 5 – опоры; 6 – дополнительные опоры

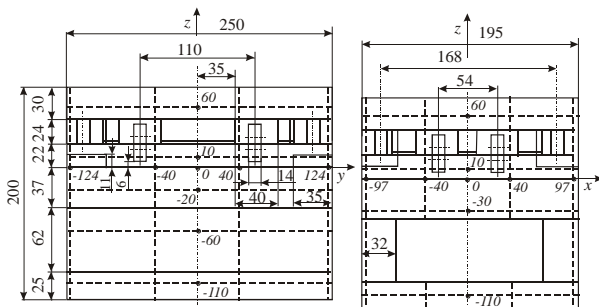


Рис. 18 – Проекция пресс-формы на плоскости zy и zx

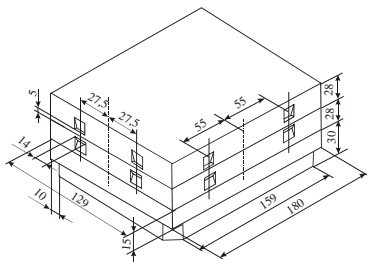


Рис. 19 – Конструкция матрицы

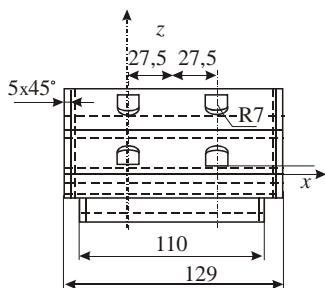
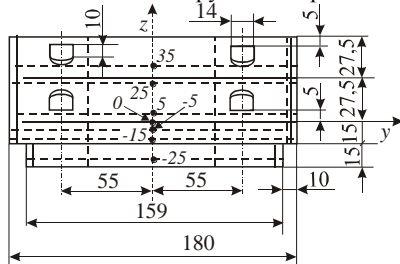


Рис. 20 – Проекция матрицы на плоскости zy и zx

Дело в том, что, как только величина локального раскрытия превысит некоторое пороговое значение

(зависит от свойств материала, заполняющего формирующую полость, от его текучести, от температуры подогрева, рабочего давления и т. п.), материал не только начнет заполнять образующиеся таким образом дополнительное пространство, но и расширять область распространения распирающего давления на новые площадки. А это, в свою очередь, как правило, приводит к дальнейшему раскрытию стыка, и т. д. Такой прогрессирующий механизм развития может продолжаться вплоть до выхода материала за пределы зеркала сопряжения полуматриц. В связи с этим отдельного исследования требует выявление характера влияния и детерминированного возмущения, вносимого упругим деформированием в характер контактного взаимодействия элементов пресс-форм, и стохастического (например, попадание на плоскость разреза отдельных твердых посторонних включений, которые вызывают предварительное искажение условий смыкания в локальной области и могут служить инициаторами начала местного покрытия стыка) возмущения на дальнейшее развитие локального раскрытия. Опасным является случай «положительной обратной связи». Т. о., обнаруживается еще один критерий при осуществлении проектных исследований пресс-форм.

Таблица 7 – Варианты сочетания конструктивных и эксплуатационных параметров

№ голограммы	Плоскость записи	Изменения в конструкции	Перепад нагрузки, кН	Внутр. давление, МПа
1	Oy	винты не касаются, опоры отсутствуют	$250 \div 330$	2,45
2	Ox	винты затянуты, установлены две опоры 62,39 мм	$1000 \div 875$	9,80
3	Oy	винты затянуты, установлены две опоры 62,39 мм	$1000 \div 875$	9,80
4 (матрица)	Ox		$50 \div 20$	0

Экспериментальное исследование пресс-форм. Одним из важнейших этапов разработки конструкций и определения работоспособности пресс-форм является экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния наиболее ответственных и нагруженных элементов конструкций (подкладных плит, опор, обжим и полуматриц). Это вызвано тем, что данные детали воспринимают действие значительных по величине усилий закрытия пресс-форм и давления расплавленной пластмассы (рабочего тела), что приводит к их деформации и может приводить к раскрытию стыков в полуматрицах. Последнее может

явиться причиной брака. С использованием предложенных в работе методов, схем измерений и расшифровки было проведено исследование напряженно-деформированного состояния опытных образцов пресс-форм методом спекл-голографической интерферометрии.

Варианты сочетания конструктивных и эксплуатационных параметров при экспериментальном исследовании НДС пресс-форм приведены в табл. 7.

Для определения рациональных геометрических параметров и конструктивных решений блоков пресс-форм (рис. 17, 18) и матриц (рис. 19, 20) методами голографической и спекл-интерферометрии проведено определение картин их деформированного состояния.

При этом в качестве основных варьируемых обобщенных параметров были выбраны способы закрепления формирующей вставки и дополнительных опор, оказывающие влияние на напряженно-деформированное состояние пресс-форм.

На рис. 21 представлены интерферограммы, характеризующие деформированное состояние блока пресс-формы. На рис. 22–24 – картины расшифровки некоторых полученных интерферограмм.

Анализ поведения элементов пресс-формы при варьировании схем нагружения и сопряжения позволяет отметить следующие особенности.

1. В целом деформированное состояние внешних поверхностей пресс-формы достаточно слабо зависит от наличия промежуточных опор и усилий закрепления полуматриц боковыми винтами.

2. По плоскостям сопряжения элементов пресс-форм, в том числе полуматриц, наблюдаются разрывы перемещений, что свидетельствует о необходимости рассмотрения пресс-формы как сложной механической системы контактирующих друг с другом элементов.

3. На картине интерференционных полос отсутствуют зоны резких градиентов, что позволяет создавать конечно-элементные модели элементов пресс-форм без зон резких изменений размеров конечных элементов.

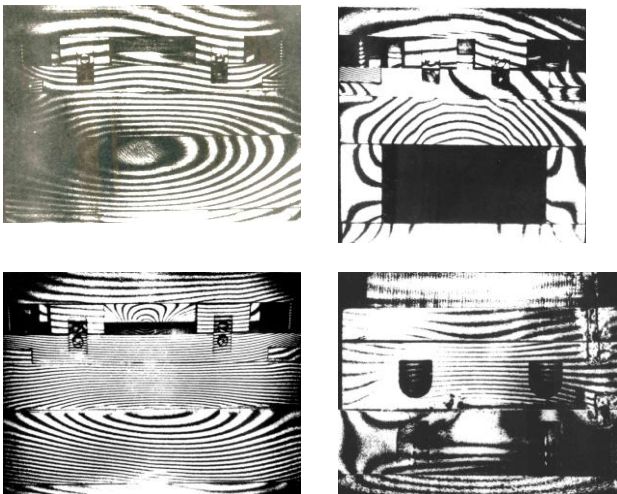


Рис. 21 – Примеры голографических интерферограмм блока пресс-формы

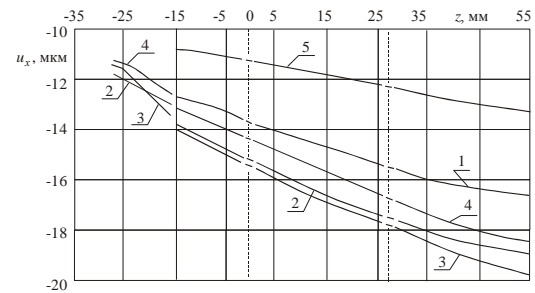


Рис. 22 – Распределение перемещений u_x точек поверхности матрицы вдоль оси z (голограмма № 4 в табл.5):

1 – $x=60$ мм; 2 – $x=20$ мм; 3 – $x=0$ мм; 4 – $x=-20$ мм; 5 – $x=-60$ мм

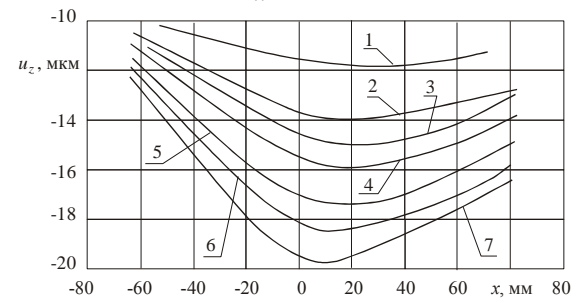


Рис. 23 – Распределение перемещений u_z (б) точек поверхности матрицы вдоль оси z (голограмма № 4 в табл.5):

1 – $x=60$ мм; 2 – $x=20$ мм; 3 – $x=0$ мм; 4 – $x=-20$ мм; 5 – $x=-60$ мм

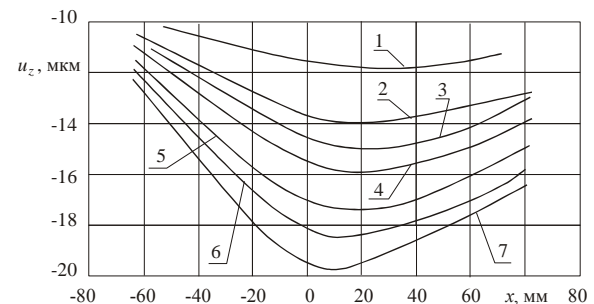


Рис. 24 – Распределение перемещений u_x точек поверхности матрицы вдоль оси x (голограмма № 14 в табл.5): 1 – $z=-25$ мм; 2 – $z=-15$ мм; 3 – $z=-5$ мм; 4 – $z=5$ мм; 5 – $z=25$ мм; 6 – $z=35$ мм; 7 – $z=55$ мм

Предложенная система решает проблему снижения стоимости, повышения оперативности и обеспечения точности изготовления деталей на предприятиях отечественного машиностроения.

Кроме того, углубленный анализ полученных результатов позволил выявить характерные проблемные моменты функционирования пресс-форм, которые вызваны тем, что основой их работы является смыкание по контактным поверхностям и действие внутренних нагрузок в формирующих полостях. Вследствие этого возможно выявление локального раскрытия стыка в сопряжениях

полуматриц пресс-форм. В свою очередь, это может запустить механизм прогрессирующего деформирования и дальнейшего расширения зоны раскрытия стыка. Т. о., сформированы новые критериальные требования при проектировании пресс-форм.

В дальнейшем требуется проведение подробных исследований влияния различных параметров и факторов на напряженно-деформированное состояние элементов пресс-форм с учетом контактного взаимодействия и расширение функциональных возможностей автоматизированной системы их анализа и синтеза, а также обеспечение высоких функциональных свойств проектируемых пресс-форм. Предложенные подходы распространяемы и на другие типы технологической оснастки, а также машиностроительные конструкции, содержащие множество элементов, находящихся в условиях контактного взаимодействия друг с другом.

Заключение. Анализ описанных в работе подходов, моделей, программных модулей и полученных с их помощью результатов свидетельствует о качественном соответствии результатов исследований данным, полученным в ходе экспериментальных исследований. При этом погрешность по перемещениям не превышает 10-15% для различных вариантов сочетания параметров.

Это позволяет заключить, что разработанные подсистемы автоматизированного анализа и синтеза расчетных моделей и элементов конструкций пресс-форм являются эффективным инструментом, позволяющим оперативно и с высокой степенью достоверности решать комплекс задач, возникающих при проектировании пресс-форм. Данные подсистемы впитали в себя результаты огромного числа численных и экспериментальных исследований и отражают важнейшие направления развития CAD/CAM/CAE-систем в отечественном машиностроении: высокая степень интеллектуации; учет специфики проектируемых изделий; возможность накопления баз знаний; обеспечение работоспособности и точности изготовления изделий; сквозная параметризация и возможность экспорта/импорта в/из различных системы автоматизированного проектирования.

Список литературы

1. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров / А. С. Кравчук // Доклады АН СССР, 1976. – Т.230. – № 2. – С.308-310.
2. Кравчук А.С., Суряков В.А. Численное решение геометрически нелинейных контактных задач / А. С. Кравчук, В. А. Суряков // Доклады АН СССР, 1981. – Т.259. – №6. – С.1327–1329.
3. Прокопишин І. Методи декомпозиції області для задач про односторонній контакт нелінійно пружних тіл / І. Прокопишин // Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології. – 2012. – Вип. 15. – С. 75–87.
4. Prokopyshyn I. I., Dyuyak I. I., Martynyak R. M. Numerical analysis of the problems of contact of three elastic bodies by the domain decomposition methods / I. I. Prokopyshyn, I. I. Dyuyak, R. M. Martynyak // Mater. Sci. –2013. – 49, No.1. – P. 45–58.
5. Kalker J.J. Variational principles of contact elastostatics / J.J. Kalker. – J. Inst. Math. and Appl. – 1977. – Vol. 20. – P. 199–221.
6. Vollebregt E.A.H. 100-fold speed-up of the normal contact problem and other recent developments in “CONTACT” / E.A.H. Vollebregt // Proceedings of the 9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. – China, 2012. – Vol. 96. – P. 201–209.
7. Vollebregt E.A.H. Assessing the accuracy of different simplified frictional rolling contact algorithms / E.A.H. Vollebregt, S.D. Iwnicki, G. Xie // Vehicle System Dynamics. – 2012. – Vol. 50. – P.1–17.
8. Сеа Ж. Оптимизация. Теория и алгоритмы. – М.: Мир, 1973. – 244 с.
9. Черноусько Ф.Л., Баничук Н.В. Вариационные задачи механики и управления. – М.: Наука, 1973. – 240 с. 3.
10. Кравчук А.С. К задаче Герца для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Прикл. мат. и мех. – 1977. –Т.41.– Вып.2. – С.329–337.
11. Кравчук А.С., Васильев В.А. Численные методы решения контактных задач для линейно- и нелинейно-упругих тел конечных размеров // Прикладная механика. – 1980. – Т.16.– Вып.6. – С.9-15.
12. Кравчук А.С., Васильев В.А. Вариационный метод в контактной задаче теории упругости / В кн. Упругость и неупругость. – М.: Наука, 1978. – С.23–31.
13. Кравчук А.С. Постановка задачи о контакте нескольких деформируемых тел как задачи нелинейного программирования // Прикл. мат. и мех. – 1978. – Т.42. – Вып.3. – С.466-474.
14. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. – М.: Наука, 1980. – 536 с.
15. Гловачек И, Ганслингер Я, Нечас И., Ловишек Я. Решение вариационных неравенств в механике. – М.: Мир, 1986. – 270 с.
16. Дюво Г., Лионс Ж.Л. Неравенства в механике и физике. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
17. Лионс Ж.Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач. – М.: Мир, 1972. – 587 с.
18. Ткачук Н.Н. Анализ контактного взаимодействия сложнопрофильных элементов машиностроительных конструкций с кинематически сопряженными поверхностями: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.09. – Харьков, 2011. – 203 с.
19. Скрипченко Н. Б. Контактное взаимодействие сложнопрофильных деталей машиностроительных конструкций с учетом локальной податливости поверхностного слоя: дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.09. –Харьков, 2016. – 178 с.
20. Решетов Д.Н. Точность металлорежущих станков / Д.Н. Решетов, В.Т. Портман. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
21. Биргер И.А. Прочность. Устойчивость. Колебания. Справочник в трех томах. / Под общей ред. И.А. Биргера и Я. Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968 – 336 с.
22. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике / О.К. Зенкевич. – М. : Мир, 1975. – 541 с.
23. Ткачук А.Н., Мовшиович И.Я., Ткачук Н. А. Термоупругие контактные задачи для элементов штампов и пресс-форм (продолжение) / А. Н. Ткачук, И. Я. Мовшиович, Н. А. Ткачук // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением – Москва, 2010. – №1. – С.19–28.
24. Храмова И.Я., Ткачук А.Н., Ткачук Н.А., Бруль С.Т., Орлов Е.А., Чепурной А.Д. Специализированная система анализа и синтеза и расчетно-экспериментальное исследование элементов пресс-форм // Вестник НТУ „ХПИ”. Тем. вып.: Машиноведение и САПР, 2005, №60, с. 151-179.
25. Капустин Н.М., Заярненко Е.И., Капустин А.А., Ткачук Н.А. Исследование прочностных и жесткостных характеристик элементов переналаживаемых приспособлений для станков с ЧПУ. – Отраслевой сборник «Вопросы оборонной техники». Серия 2. – 1987. – вып. 7 (193). – С.42-47.

26. Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальный метод исследования напряженно-деформированного состояния элементов транспортных средств и технологических систем / Н.А. Ткачук // Вісник Державного технічного університету сільського господарства. Тематичний випуск: "Механізація сільськогосподарського виробництва". Збірник наукових праць Державного технічного університету сільського господарства. – Харків: ХДТУСГ, 2003.– вип.21. – С.20-29.
- Bibliography (transliterated):**
1. Kravchuk A.S. K zadache Gertsya dlya lineyno- i nelineyno-uprugih tel konechnykh razmerov / A. S. Kravchuk // Doklady AN SSSR, 1976. – T.230. –No 2.– p.308-310.
 2. Kravchuk A. S., Sursyakov V.A. Chislennoe reshenie geometricheski nelineynykh kontaktnykh zadach / A. S. Kravchuk, V. A. Sursyakov // Doklady AN SSSR, 1981. – T.259. – No 6.– P.1327–1329.
 3. Prokopishin I. Metodi dekompozitsiyi oblasti dlya zadach pro odnostonnyy kontakt nelineynoy pruzhnykh til / I. Prokopishin // Fiz.-mat. modelyuvannya ta Inform. tehnologiyi. – 2012. – Vol. 15. – P. 75–87.
 4. Prokopyshyn I. I., Dyyak I. I., Martynyak R. M. Numerical analysis of the problems of contact of three elastic bodies by the domain decomposition methods / I. I. Prokopyshyn, I. I. Dyyak, R. M. Martynyak // Mater. Sci. –2013. – 49, No.1. – P. 45–58.
 5. Kalker J. J. Variational principles of contact elastostatics / J.J. Kalker. – J. Inst. Math. and Appl. – 1977. – Vol. 20. – P. 199–221.
 6. Vollebregt E.A.H. 100-fold speed-up of the normal contact problem and other recent developments in "CONTACT" / E.A.H. Vollebregt // Proceedings of the 9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. – China, 2012. – Vol. 96. – P. 201–209.
 7. Vollebregt E.A.H. Assessing the accuracy of different simplified frictional rolling contact algorithms / E.A.H. Vollebregt, S.D. Iwnicki, G. Xie // Vehicle System Dynamics. – 2012. – Vol. 50. – P.1–17.
 8. Sea Zh. Optimizatsiya. Teoriya i algoritmy. – Moscow: Mir, 1973. – 244 s.
 9. Chernousko F.L., Banichuk N.V. Variatsionnyye zadachi mekhaniki i upravleniya. – Moscow: Nauka, 1973. – 240 p. 3.
 10. Kravchuk A.S. K zadache Gertsya dlya lineyno- i nelineyno-uprugih tel konechnykh razmerov // Prikl. mat. i meh. – 1977. –T.41.– Vol.2. – P.329–337.
 11. Kravchuk A.S., Vasilev V.A. Chislennyye metodyi resheniya kontaktnykh zadach dlya lineyno- i nelineyno-uprugih tel konechnykh razmerov // Prikladnaya mehanika. – 1980. – T.16.– Vol.6. – P.9-15.
 12. Kravchuk A.S., Vasilev V.A. Variatsionnyy metod v kontaktnoy zadache teorii uprugosti / V kn. Uprugost i neuprugost. – Moscow: Nauka, 1978. – P.23–31.
 13. Kravchuk A.S. Postanovka zadachi o kontakte neskolkih deformiruyemykh tel kak zadachi nelineynogo programmirovaniya // Prikl. mat. i meh. – 1978. – T.42. – Vol. 3. – P. 466-474.
 14. Marchuk G.I. Metodyi vychislitelnoy matematiki. – Moscow: Nau-ka, 1980. – 536 p.
 15. Glovachek I, Ganslinger Ya, Nechas I., Lovishek Ya. Reshenie variatsionnykh neravenstv v mehanike. – Moscow: Mir, 1986. – 270 p.
 16. Dyuvo G., Lions Zh.L. Neravenstva v mehanike i fizike. – Moscow: Nauka, 1980. – 384 p.
 17. Lions Zh.L. Nekotorye metodyi resheniya nelineynykh kraevykh zadach. – Moscow: Mir, 1972. – 587 p.
 18. Tkachuk N.N. Analiz kontaktnogo vzaimodeystviya slozhnopro-filnykh elementov mashinostroitelnykh konstruksiy s kinematischeski sopryazhennymi poverhnostyami: dis. ... kand. tehn. nauk: spets. 05.02.09. – Harkov, 2011. – 203 p.
 19. Skripchenko N. B. Kontaktnoe vzaimodeystvie slozhnoprofilnykh detaley mashinostroitelnykh konstruksiy s uchedom lokalnoy podatlivosti poverhnostnogo sloya: dis. ... kand. tehn. nauk: spets. 05.02.09. –Harkov, 2016. – 178 p.
 20. Reshetov D.N. Tochnost metallorazhushchih stankov / D.N. Reshetov, V.T. Portman. – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 336 p
 21. Birger I.A. Prochnost. Ustoychivost. Kolebaniya. Spravochnik v trekh tomah. / Pod obschey red. I.A. Birgera i Ya. G. Panovko. – Moscow: Mashinostroenie, 1968 – 336 p.
 22. Zenkevich O.K. Metod konechnykh elementov v tehnikе / O.K. Zenkevich. –Moscow: Mir, 1975. – 541p.
 23. Tkachuk A. N., Movshovich I.Ya., Tkachuk N. A. Termouprugie kontaktnyye zadachi dlya elementov shtampov i press-form (prodolzhenie) / A. N. Tkachuk, I. Ya. Movshovich, N. A. Tkachuk // Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem – Moscow, 2010. – No 1. – p. 19–28.
 24. Hramtsova I. Ya., Tkachuk A. N., Tkachuk N.A., Brul S.T., Orlov E.A., Chepurnoy A.D. Spetsializirovannaya sistema analiza i sinteza i raschetno-eksperimentalnoe issledovanie elementov press-form // Vestnik NTU „HPI”. Tem. vyip.: Mashinovedenie i SAPR, 2005, No 60, p. 151-179.25.
 25. Kapustin N.M., Zayarnenko E.I., Kapustin A.A., Tkachuk N.A. Issledovanie prochnostnykh i zhestkostnykh karakteristik elementov perenalazhivaemykh prispobleniy dlya stankov s ChPU. – Otrasevyy sbornik «Voprosy oboronnoy tehniki». Seraya 2. – 1987. – vol. 7 (193). – S.42-47.
 26. Tkachuk N.A. Raschetno-eksperimentalnyy metod issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya elementov transportnykh sredstv i tehnologicheskikh sistem / N.A. Tkachuk // Visnik Derzhavnogo tehnikhnogo univrsitetu sil'skogo gospodarstva. Tematichnyy vipusk: "Mehanizatsiya sil'skogospodarskogo virobništva". Zbİrnik naukovih prats Derzhavnogo tehnikhnogo univrsitetu sil'skogo gospodarstva. – Kharkiv: HDTUSG, 2003.– vip.21. – P.20-29.

Поступила (received) 05.02.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Контактна взаємодія елементів технологічної оснастки: математичне моделювання, комп'ютерний аналіз та експериментальне дослідження / М. М. Ткачук, Н. Б. Скрипченко, В. І. Кохановський, А. А. Зарубіна, І. Я. Храмцова, О. І. Шейко, М. Л. Белов, А. М. Малакей, С. С. Яцив // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 5 (1227). – С. 141–156. – Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2079-0066.

Контактное взаимодействие элементов технологической оснастки: математическое моделирование, компьютерный анализ и экспериментальные исследования / Н. Н. Ткачук, Н. Б. Скрипченко,

В. И. Кохановский, А. А. Зарубина, И. Я. Храмцова, А. И. Шейко, Н. Л. Белов, А. Н. Малакей, С. С. Яцив // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 5 (1227). – С. 141–156. – Библиогр.: 26 назв. – ISSN 2079-0066.

Contact interaction of elements of production tools: mathematical modeling, computer analysis and experimental research / M. M. Tkachuk, N. B. Skripchenko, V. I. Kokhanovskiy, A. O. Zarubina, I. Y. Khramtsova, O. I. Seyko, M. I. Belov, A. M. Malakei, S. S. Yatsyv // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Transport machine building. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 5 (1227). – P. 141–156. – Bibliogr.: 26. – ISSN 2079-0066.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ткачук Микола Миколайович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», докторант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин» тел.: (057) 707-69-01; e-mail: mikolei@rambler.ru.

Ткачук Николай Николаевич – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», докторант кафедры «Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин» тел.: (057) 707-69-01; e-mail: mikolei@rambler.ru.

Tkachuk Mykola Mykolayovych – Ph.D., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", doctorante at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, tel.: (057) 707-69-01; e-mail: mikolei@rambler.ru.

Скрипченко Наталія Борисівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», тел.: (057) 707-65-34; e-mail: natalia.skripchenko@ntu.kharkiv.edu.

Скрипченко Наталья Борисовна – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», научный сотрудник кафедры «Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин», тел.: (057) 707-65-34; e-mail: natalia.skripchenko@ntu.kharkiv.edu.

Skripchenko Nataliia Borisyvna – Ph.D., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", resercher at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, tel.: (057) 707-65-34; e-mail: natalia.skripchenko@ntu.kharkiv.edu.

Кохановський Володимир Ілліч – кандидат технічних наук, керівник відділу впровадження CAD/CAM систем, ПАТ «У.П.Е.К.», тел. (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Кохановский Владимир Ильич – кандидат технических наук, руководитель отдела внедрения CAD/CAM систем, ПАТ «У.П.Е.К.», тел. (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Kokhanovskiy Volodymyr Ilich – Ph.D., Head of implementation of CAD/CAM-systems, UPEC Industrial Group, tel.: (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Зарубіна Алла Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», тел.: (057) 707-69-01.

Зарубина Алла Александровна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», професор кафедри «Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин», тел.: (057) 707-69-01.

Zarubina Alla Oleksandrivna – Ph.D., assistant professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", professor at Theory and systems of mechanisms and machines automated design department; tel.: (057) 707-69-01.

Храмцова Ірина Яківна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин», тел.: (057) 707-69-01.

Храмцова Ирина Яковлевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», научный сотрудник кафедры «Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин», тел.: (057) 707-69-01.

Khramtsova Iryna Yakivna – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", research associate at Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department; tel.: (057) 707-69-01.

Шейко Олександр Іванович – головний інженер, ДП «Завод ім. В. О. Малишева», тел. (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Шейко Александр Иванович – главный инженер, ГП «Завод им. В. А. Малишева», тел. (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Seyko Oleksandr Ivanidych – chief engineer at the SE «Zavod im. V. O. Malisheva», tel.: (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Белов Николай Львович – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший научный сотрудник кафедры «Теория и системы автоматизированного проектирования механизмов и машин», тел.: (057) 707-69-01.

Белов Микола Львович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", тел.: (057) 707-69-01.

Belov Mykola Lvovych – Ph.D., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior researcher at Theory and systems of mechanisms and machines automated design department; tel.: (057) 707-69-01.

Малакей Андрій Миколайович – заступник генерального директора з якості ДП "Завод ім. Малишева", Харків; тел. (057) 784-40-08, e-mail: kanc@malyshev.kharkov.ua.

Малакей Андрей Николаевич – зам. генерального директора по качеству ГП "Завод им. Малышева", Харьков; тел. (057) 784-40-08, e-mail: kanc@malyshev.kharkov.ua.

Malakei Andrii – deputy general director for quality at the "Malyshev Plant", Kharkov; tel.: (057) 784-40-08, e-mail: kanc@malyshev.kharkov.ua.

Яцив Степан Степанович – заступник головного інженера ДП «Завод ім. В. О. Малишева», тел. (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.

Яцив Степан Степанович – заместитель главного инженера ГП «Завод им. В. А. Малышева», тел. (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org

Yatsyv Stepan Stepanovych – deputy of chief engineer at the SE «Zavod im. V. O. Malisheva», tel.: (057) 707-69-02, tma@tmm-sapr.org.