

Исследование термоупругопластического контактного деформирования составных конструкций технологической оснастки

С. В. Бондарь, Д. В. Лавинский

Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, Украина

Представлен метод анализа термоупругопластического контактного деформирования составных конструкций на основе единого методологического подхода. В качестве численного метода используется метод конечных элементов. Рассмотрена задача определения напряженно-деформированного состояния одного класса составных бандажированных матриц для полугорячего выдавливания. Приведены рекомендации относительно проектирования технологической оснастки.

Ключевые слова: термоупругопластическое деформирование, контактное взаимодействие, прочность, жесткость, метод конечных элементов, теплопередача, составные бандажированные матрицы.

Актуальность темы и состояние проблемы. Развитие машиностроения невозможно без применения экономичных методов обрабатывающего производства. Технологические процессы, основанные на использовании свойств пластичности материалов, отличаются высокой производительностью и экономичностью, что обусловило их широкое применение. Наиболее эффективным малоотходным процессом является обработка металлов давлением (ОМД). Использование этих процессов позволяет получать точные заготовки с минимальными припусками на механическую обработку, а в некоторых случаях – практически готовые детали [1–4]. Однако при их внедрении, особенно при обработке деталей из трудно деформируемых металлов, возникают проблемы, связанные с недостаточной прочностью и надежностью элементов оснастки. Как следствие этого, необходимым становится проведение адекватного прочностного анализа при проектировании элементов оборудования [1–4].

Основная часть аналитических методов расчета матриц базируется на формулах Ламе и сводится в итоге к определению напряжений в толстостенном цилиндре. Например, в работе [5] решение Ламе используется для определения необходимого количества бандажей. Реальные конструкции матриц штампов могут значительно отличаться от толстостенных цилиндров, и принимаемые упрощения зачастую приводят к неверным результатам. Также необходимо отметить наличие зон контактного взаимодействия, влияние которых при расчетах аналитическими методами либо не учитывается, либо учитывается не в полной мере.

Повысить точность расчетов, учесть многие факторы, которые нельзя было учесть аналитическими методами, можно с использованием численных методов анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции. Одним из наиболее распространенных численных методов является метод конечных элементов (МКЭ). В настоящее время существуют уни-

версальные КЭ-программные комплексы ANSYS, COSMOS/М и др., которые позволяют решать задачи определения НДС практически любых конструкций. Также существуют разработки КЭ-методов решения задач расчета и проектирования элементов технологической оснастки [6–8]. Однако эти разработки в той или иной мере базируются на первоначальных упрощениях контактного взаимодействия, поведения материала и распределения температуры. Предлагаемый ниже метод позволяет решать задачи определения НДС именно составных конструкций и исследовать контактное взаимодействие элементов. Причем решение задачи теплопроводности и термоупругопластического деформирования осуществляется одновременно без суперпозиции решений, принятых в известных программных разработках. Также предлагается способ учета тепла, выделяемого при пластическом деформировании и трении, путем введения на границе контакта источников тепловыделения.

Математическая постановка проблемы. Рассмотрим общую математическую постановку задачи термоупругопластического контактного деформирования составных конструкций, когда их геометрия и условия нагружения удовлетворяют условиям осевой симметрии.

Одной из составляющих нагрузки является неоднородное температурное поле. Рассмотрим решение задачи стационарной теплопроводности, которое применяется при оценке температурной нагрузки соответственно к процессам полугорячего выдавливания (ПГВ) [4] и сводится к поиску минимума функционала:

$$I = \iint_S \left\{ \frac{K}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] - Q(r, z)T(r, z) \right\} r dS + \\ + \int_{L_2} q(r, z)T(r, z)r dL + \int_{L_3} \frac{\alpha}{2} [T^2(r, z) - 2T_\infty T(r, z)] r dL, \quad (1)$$

где $T(r, z)$ – функция распределения температуры; $Q(r, z)$ – плотность внутренних источников тепловыделения, которое определяется через работу пластического деформирования заготовки и выход тепла при трении; $q(r, z)$ – плотность потока через некоторую границу L_2 ; α – коэффициент конвективного теплообмена через некоторую границу L_3 ; T_∞ – температура внешней среды.

На границе L_4 между отдельными частями S_i, S_j конструкции приняты условия идеального теплового контакта (граничные условия 4-го рода):

$$T_i(r, z \in L_4) = T_j(r, z \in L_4); \\ K(S_i) \left(\frac{\partial T_i(r, z \in L_4)}{\partial r} l_r + \frac{\partial T_i(r, z \in L_4)}{\partial z} l_z \right) = \\ = K(S_j) \left(\frac{\partial T_j(r, z \in L_4)}{\partial r} l_r + \frac{\partial T_j(r, z \in L_4)}{\partial z} l_z \right), \quad (2)$$

где $T_i(r, z \in L_4), T_j(r, z \in L_4)$ – температура составных частей S_i, S_j на границе контакта; $K(S_i), K(S_j)$ – коэффициенты теплопроводности мате-

риала каждой части; l_r, l_z – направляющие косинусы общей нормали к границе контакта.

Рассмотрим решение задачи термоупругопластичности в вариационной постановке, которая сводится к отысканию минимума функционала полной энергии (функционала Лагранжа) системы взаимодействующих тел:

$$E = \Pi - A_o - A_{\Pi}, \quad (3)$$

где Π – потенциальная энергия деформации упругой системы; A_o – работа объемных сил; A_{Π} – работа поверхностных сил.

Подставляя в функционал выражения потенциальной энергии и работ поверхностных сил, записанные для осесимметричной задачи с учетом температурных деформаций, получаем

$$E = \iint_S [\sigma_r(\varepsilon_r - \alpha\Delta T) + \sigma_z(\varepsilon_z - \alpha\Delta T) + \sigma_{\theta}(\varepsilon_{\theta} - \alpha\Delta T) + \tau_{rz}\gamma_{rz}] r dS - \\ - 2\pi \int_{L_r} P_r u_r dL_r + 2\pi \int_{L_z} P_z u_z dL_z, \quad (4)$$

где u_r, u_z – перемещения точек тела в направлении осей r и z .

Для описания процесса упругопластического деформирования системы заготовка–матрица приняты соотношения теории малых упругопластических деформаций Ильюшина в форме переменных параметров упругости [9, 10].

Условие минимума функционала (4) достигается при выполнении условия

$$\delta(\Pi - A_o - A_{\Pi}) = 0. \quad (5)$$

Особенности решения контактной задачи. В общем случае для точек, которые принадлежат контактными поверхностям, условия сопряжения сформулированы неравенствами:

$$u_n^{m-1} + u_n^{m+1} - \delta_{0n}^m \leq 0, \quad \sigma_{nn}^m \leq 0, \quad (6)$$

где $u_n^{m-1}, u_n^{m+1}, \delta_{0n}^m$ – нормальные перемещения точек поверхностей контактирующих областей и начальный зазор (натяг); σ_{nn}^m – нормальные напряжения на контактирующих поверхностях.

Первое условие в (6) физически означает “непроникновение” контактирующих тел. При выборе зазора между телами возникает контактное давление. Механизмы контактного взаимодействия между соответствующими точками контактирующих поверхностей областей моделировались путем введения контактного слоя со специальными свойствами. В пределах возможной области контакта этот слой наделен специальными свойствами, что позволяет “внешнюю нелинейность”, обусловленную условиями (6), свести к “внутренней нелинейности” контактного слоя и рассмотреть взаимодействие тел, раз-

деленных слоев с известными нелинейными свойствами (рис. 1). С помощью моделирования можно описать такие механизмы взаимодействия контактирующих тел, как сцепление:

$$\sigma_{nt}^{m-1} = \sigma_{nt}^{m+1}; \quad u_{nt}^{m-1} = u_{nt}^{m+1}, \quad (7)$$

проскальзывание:

$$\sigma_{nt}^{m-1} = \sigma_{nt}^{m+1} = 0, \quad (8)$$

сухое трение и т.д.

Условия фрикционного взаимодействия приняты в форме законов, связывающих касательные и нормальные составляющие напряжений на площадках контакта в виде закона Кулона:

$$|\sigma_{nt}| = f_n \sigma_{nn} \quad (9)$$

или закона Зибеля:

$$|\sigma_{nt}| = f_m \sigma_m, \quad (10)$$

где σ_m – предел текучести материала; f_m – коэффициент трения.

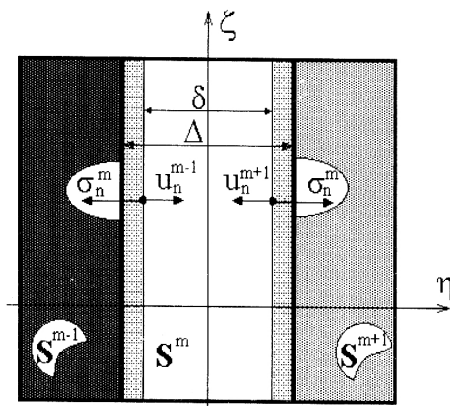


Рис. 1. Модель контактного слоя.

Согласно рекомендациям, приведенным в литературных источниках, формулу (9) следует применять для анализа осадки ОМД при процессах, в которых преобладают растягивающие напряжения с выполнением условия $\sigma_m \geq |\sigma_n|$. При анализе процессов прессования и объемной штамповки, характеризующихся схемой всестороннего сжатия с большим отрицательным средним напряжением, необходимо использовать формулу Зибеля (10).

Поскольку для анализа НДС матриц ОМД приняты осесимметричные модели, что характерно для процессов объемной штамповки, трение между заготовкой и рабочей поверхностью матрицы моделировалось по закону Зибеля, а трение между частями матрицы – по закону Кулона. Тестирование программных средств, использующих приведенный выше метод решения контактной задачи, проведено ранее [11, 12]. Введение контактного слоя также

позволяет эффективно решать задачу теплопроводности, наделив контактные элементы специальными теплофизическими свойствами. Результаты исследований по выбору параметров контактного слоя для решения задачи теплопроводности представлены в работе [13].

Численный метод решения. В качестве базового осесимметричного конечного элемента используется изопараметрический четырехузловой плоский элемент с билинейной аппроксимацией перемещений и температуры внутри элемента, показанного на рис. 2 в глобальной и локальной системах координат. В локальной системе координат конечный элемент имеет вид единичного квадрата (рис. 2,б), центр которого совмещен с началом координат.

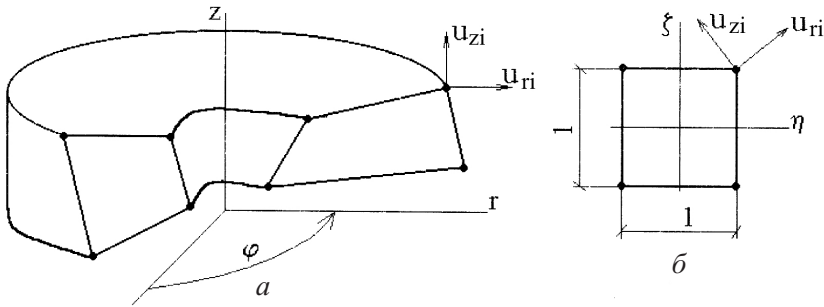


Рис. 2. Базовый плоский (осесимметричный) конечный элемент в глобальной (а) и локальной (б) системах координат.

Законы распределения перемещений (\$u_r\$, \$u_z\$) и температуры (\$T\$) внутри конечного элемента при принятых ограничениях имеют вид

$$\begin{cases} u_r(\eta, \zeta) = b_1 + b_2\eta + b_3\zeta + b_4\eta\zeta; \\ u_z(\eta, \zeta) = a_1 + a_2\eta + a_3\zeta + a_4\eta\zeta; \\ T(\eta, \zeta) = c_1 + c_2\eta + c_3\zeta + c_4\eta\zeta. \end{cases} \quad (11)$$

Исходя из зависимостей (11) перемещение и температуру в пределах конечного элемента можно представить так:

$$\begin{aligned} u_r(r, z) &= \sum_{i=1}^4 u_{ri} \varphi_i(\eta, \zeta); & u_z(r, z) &= \sum_{i=1}^4 u_{zi} \varphi_i(\eta, \zeta); \\ T(r, z) &= \sum_{i=1}^4 T_i \varphi_i(\eta, \zeta), \end{aligned} \quad (12)$$

где \$u_{ri}\$, \$u_{zi}\$ – значения узловых перемещений; \$T_i\$ – значения узловых температур; \$\varphi_i(\eta, \zeta)\$ – координатные функции конечного элемента, определяемые по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \varphi_1(\eta, \zeta) &= (\eta - 0,5)(\zeta - 0,5); & \varphi_2(\eta, \zeta) &= -(\eta + 0,5)(\zeta - 0,5); \\ \varphi_3(\eta, \zeta) &= -(\eta - 0,5)(\zeta + 0,5); & \varphi_4(\eta, \zeta) &= (\eta + 0,5)(\zeta + 0,5). \end{aligned} \quad (13)$$

Как известно, выбор закона распределения искомым функций (перемещения, температура и т.д.) внутри элемента во многом определяет внутреннюю сходимость приближенного решения МКЭ к точному при уменьшении размеров конечных элементов. При этом принятые функции перемещений и температуры должны удовлетворять основным критериям сходимости [14].

Описанная методика решения термоупругопластических смешанных контактных осесимметричных задач реализована в модуле для программного комплекса SPACE-T, созданного на базе МКЭ [12]. В работах [11–13] представлено сравнение результатов, полученных с помощью указанного комплекса, с данными экспериментальных прочностных исследований технологической оснастки. Результаты сравнения являются удовлетворительными, что позволяет использовать предложенную методику для решения практических задач.

Расчетные примеры. С помощью описанной выше методики и созданного программного обеспечения были проведены расчеты и даны рекомендации относительно проектирования технологического оснащения для ПГВ осесимметричных цилиндрических втулок. Ниже рассмотрим результаты проведенных расчетов.

При формировании и описании расчетных схем элементов оснастки для технологических операций следует иметь в виду, что априори невозможно ввести единую расчетную схему. В каждом конкретном случае конструкции будут различаться между собой геометрией, топологией, используемым материалам и рядом других параметров. В случае объемной штамповки матрица представляет собой совокупность тел вращения, которые имеют единую ось, ограниченных поверхностями второго порядка: цилиндрическими, коническими и их комбинацией.

На рис. 3 представлена обобщенная расчетная схема НДС многослойной бандажированной матрицы для объемной штамповки осесимметричных заготовок. К характерным составным частям рассмотренных в работе матриц для ПГВ относятся рабочая вставка и бандаж, количество которых определяется технологическими требованиями. К рабочей вставке, используемой с целью обеспечения необходимой формы изделия, предъявляются повышенные прочностные и жесткостные требования, которые связаны в первую очередь с геометрической неизменностью рабочей поверхности при деформировании заготовки. Поэтому в точках рабочей поверхности вставки недопустимо появление зон пластических деформаций. Таким образом, требование неизменности ее поверхности позволяет сформулировать условие прочностной работоспособности матрицы в виде объединения неравенств:

$$\{\sigma_i < \sigma_m^{\text{вст}}\} \cup \{U_{\text{max}} < U^{\text{вст}}\}, \quad (14)$$

где σ_i – интенсивность напряжений в точках рабочей поверхности вставки; $\sigma_m^{\text{вст}}$ – предел текучести материала вставки; U_{max} – полное максимальное перемещение в точках рабочей поверхности вставки; $U^{\text{вст}}$ – перемещения рабочей вставки, которые допускаются технологически.

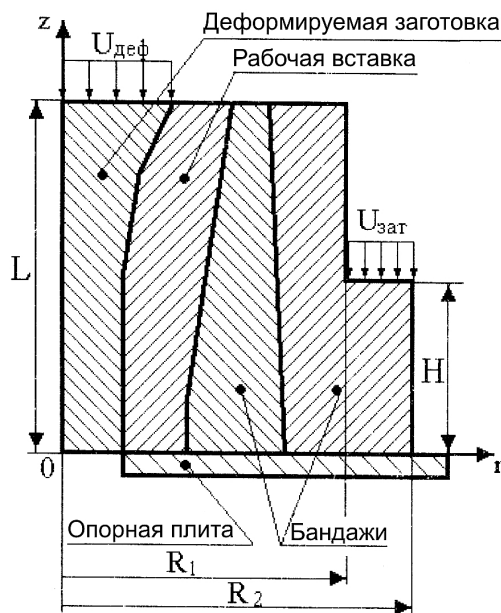


Рис. 3. Обобщенная расчетная схема матрицы с заготовкой.

Кроме рабочей вставки матрицы заготовка взаимодействует с пуансоном и выталкивателем. При анализе НДС матрицы влияние пуансона на заготовку может быть традиционно заменено давлением $P_{\text{деф}}$, прикладываемым по нормали к верхнему торцу заготовки [4]. Более достоверным, по нашему мнению, является моделирование воздействия пуансона путем кинематического задания соответствующих значений перемещений в точках верхнего торца заготовки, что и принято в виде условия

$$u_z(r, z)|_{z=L} = U_0, \quad (15)$$

где U_0 – заданное вертикальное перемещение верхнего торца заготовки.

Принятое моделирование воздействия выталкивателя отвечает условию свободного опирания в вертикальном направлении в точках нижнего торца заготовки в виде

$$u_z(r, z)|_{z=0} = 0. \quad (16)$$

Опорная плита была исключена из рассмотрения. Поэтому в точках рабочей поверхности вставки и бандажей с координатами $z=0$ приняты условия свободного опирания в виде (16). Чтобы исключить или значительно уменьшить радиальные перемещения элементов матрицы, внешний бандаж, как правило, с помощью болтового соединения крепится к опорной плите. Учитывая это, для точек внешнего бандажа с координатой $z=0$ дополнительно к условию (16) вводится условие вида

$$u_r(r, z)|_{z=0} = 0. \quad (17)$$

Расчетная схема матрицы в виде КЭ-модели представлена на рис. 4. В расчетах учитывалось предыдущее натяжение путем заданий перемещений ($U_{\text{зат}}$) верхнего торца внешнего банджа. Условия одностороннего контакта конкретизированы путем введения слоев контактных конечных элементов (ККЭ), которые учитывались при моделировании натяга между частями матрицы и трения по закону Кулона (ККЭ1), а также трения между рабочей поверхностью вставки и заготовкой по закону Зибеля (ККЭ2). Расчеты прочности матриц проводились с учетом неравномерного температурного поля, которое обусловлено температурой нагретой заготовки, тепловыделением при ее пластическом деформировании, трением между заготовкой и матрицей и температурой охлаждения на внешней поверхности наружного банджа. Рассматривались разные законы распределения температуры, которые отвечают началу процесса выдавливания и установившимся температурным режимам выдавливания. Температурное поле на установившихся режимах определялось путем решения задачи стационарной теплопроводности. Оказалось, что в начале процесса выдавливания интенсивность напряжений в опасных сечениях значительно ниже, чем в дальнейшем рабочем цикле выдавливания на установившихся температурных режимах.

На рис. 5 представлено распределение напряжений в меридиональном сечении матрицы и их изменение по толщине в опасных сечениях.

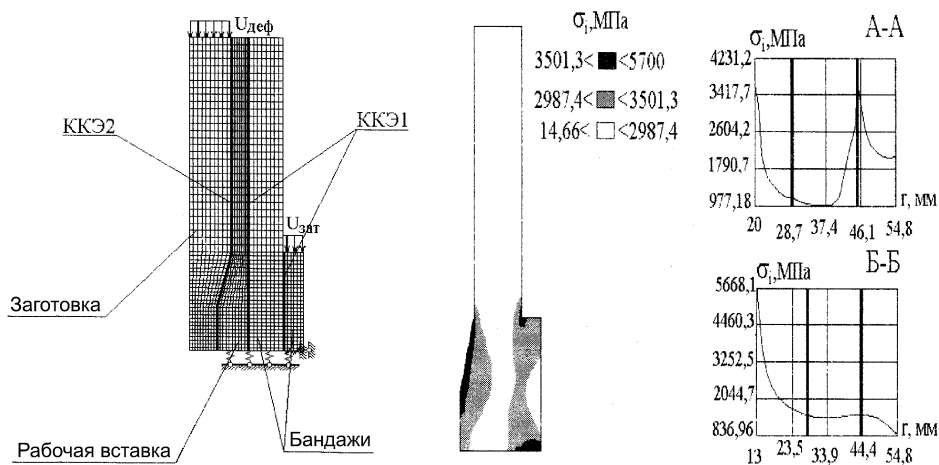


Рис. 4. КЭ-модель составной матрицы.

Рис. 5. Распределение напряжений в матрице.

Анализ НДС позволяет отметить следующее. В точке контакта верхнего торца внешнего банджа с внутренней находится зона концентрации напряжений. Радиальные перемещения внутренней поверхности рабочей вставки, обусловленные нагреванием в области верхнего торца, довольно значительны и при определенных условиях могут превышать допустимые. С целью определения возможности их уменьшения были проведены расчеты, в которых варьировались температура охлаждения и величина внешнего банджа. Результаты этих расчетов в виде диаграмм приведены на рис. 6.

Видно, что при температуре охлаждающей жидкости порядка 298...303 К максимальные перемещения не превышают технологически допустимые от-

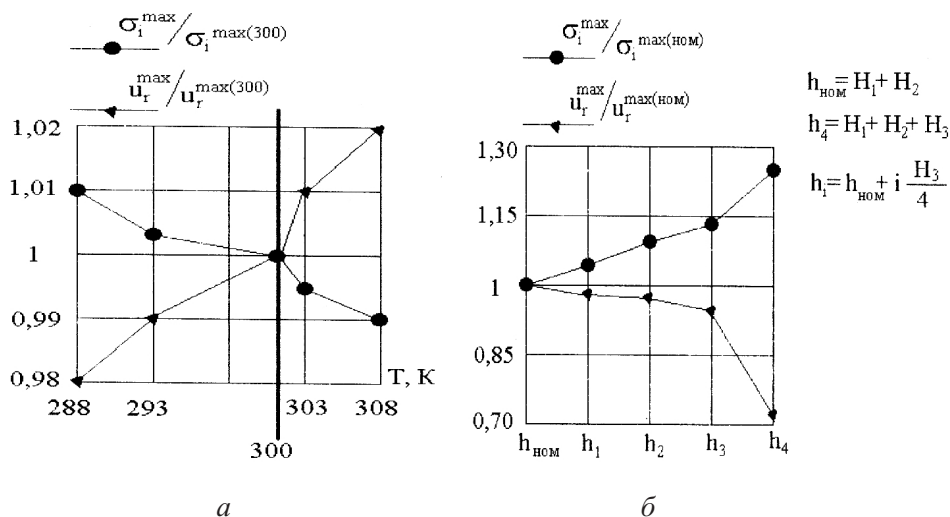


Рис. 6. Зависимость максимальных радиальных перемещений рабочей вставки и интенсивности напряжений от температуры охлаждения (а) и высоты внешнего бандажа (б).

клонения радиальных размеров. При увеличении высоты внешнего бандажа результаты расчета свидетельствуют о невысокой эффективности такого приема. Это обусловлено тем, что максимальные перемещения значительно (примерно на 30%) уменьшаются, если высота внешнего бандажа достигает общей высоты матрицы. Однако при этом возникают проблемы конструктивного характера, связанные с креплением “высокого” бандажа. Отметим, что в случае предельно высокого бандажа на 25% возрастает максимальная интенсивность напряжений, что отвечает как жесткости конструкции, так и повышению перепада температуры по толщине матрицы. С целью устранения концентратора рассматривался вариант матрицы, у которой высота внешнего бандажа выше линии действия максимальной нагрузки на рабочую поверхность. Одна из общих рекомендаций по проектированию матриц подобного класса состоит в возможно более гладкой конструктивной форме элементов бандажа. Следует предусмотреть перемещение исходных геометрических концентраторов напряжений в область, выше соответствующих зон действия максимальной нагрузки на матрицу.

Проведенные расчеты позволяют дать конкретные рекомендации по проектированию и разработке нового технологического оснащения для обработки металлов давлением. Также можно сформулировать пути дальнейшего совершенствования предложенной методики, что обусловлено необходимостью проведения расчетов штампов при формоизменении заготовок с большими значениями пластических деформаций и расчетов при высокоскоростном (импульсном) воздействии на заготовку:

- усовершенствование моделирования контактного взаимодействия (более сложные модели трения и неидеальный тепловой контакт);
- использование более адекватных теорий нелинейного поведения материала заготовки (инкрементальные теории пластичности);
- учет динамической составляющей при деформировании заготовки.

Резюме

Наведено метод аналізу термопружнопластичного контактного деформування складених конструкцій на основі єдиного методологічного підходу. В якості числового методу використовується метод скінченних елементів. Розглянуто задачу визначення напружено-деформованого стану одного класу складених бандажованих матриць для напівгарячого видавлювання. Даються рекомендації щодо проектування технологічної оснастки.

1. *Холодная* объемная штамповка: Справочник / Под ред. Г. А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
2. *Ковка* и штамповка: Справочник. В 4 т. – Т. 3. Холодная объемная штамповка / Под ред. Г. А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1987. – 384 с.
3. *Непершина Р. И., Шамис М. Д., Мохнев В. И.* Особенности проектирования бандажированных матриц для холодной объемной штамповки с применением прочностного расчета // Кузнеч.-штамп. пр-во. – 1986. – № 11. – С. 22.
4. *Евстратов В. А.* Основы технологии выдавливания и конструирования штампов. – Харьков: Вища шк., 1987. – 144 с.
5. *Ганаго О. А., Марченко В. Л., Ковтун В. В.* Расчет и оптимизация конструкций осесимметричных матриц для холодной объемной штамповки // Кузнеч.-штамп. пр-во. – 1985. – № 8. – С. 34 – 36.
6. *Lange K.* On the stress distribution in prestressed extrusion dies under non-uniform distribution of internal pressure // Int. J. Sci. – 1985. – 27, No. 3. – P. 169 – 175.
7. *Wibmeier H.-J.* Compute-unterstütztes Auslegen von Fließpreßwerkzeugen // Drahtwelt. – 1985. – No. 12. – S. 263 – 267.
8. *Торяник В. В.* Разработка и внедрение высокостойких штампов для холодного и полугорячего выдавливания: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Харьков, 1992. – 32 с.
9. *Термопрочность* деталей машин / Под ред. И. А. Биргера, Б. Ф. Шорра. – М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.
10. *Писаренко Г. С., Можаровский Н. С.* Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести: Справочное пособие. – Киев: Наук. думка, 1981. – 494 с.
11. *Бондарь С. В., Зубатый С. С., Лавинский Д. В.* Исследование концентрации напряжений в пуансонах с клиновидной посадочной частью // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. – 1998. – № 27. – С. 188 – 192.
12. *Бондарь С. В., Зубатый С. С., Киркач Б. Н., Лавинский В. И.* Программный комплекс SPACE-T для решения термоупругопластических контактных задач // Динамика и прочность машин. – 2000. – № 57. – С. 24 – 34.
13. *Конохов В. И., Лавинский Д. В.* Термоупругое контактное деформирование осесимметричных тел // Вісн. нац. техн. ун-ту “Харківський політехнічний інститут”. – 2003. – № 5. – С. 93 – 98.
14. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

Поступила 24. 12. 2008